
BACHELORARBEIT

Herr
Kevin Hanelt

**„Untersuchungen zum Hoch-
geschwindigkeitslaser-
schweißen an alternativen
Stoßarten mit 5 kW Monomo-
de Faserlaser“**

Mittweida, 2016

BACHELORARBEIT

„Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitslaser-schweißen an alternativen Stoßarten mit 5 kW Monomode Faserlaser“

Autor:

Herr

Kevin Hanelt

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB12wF-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Jan Drechsel

Einreichung:

Mittweida, den 17.11.2016

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2016

Bibliografische Beschreibung:

Hanelt, Kevin :

Untersuchungen zum Hoch-geschwindigkeitslaserschweißen an alternativen Stoßarten mit 5 kW Monomode Faserlaser. - 2016 – 45 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2016

Referat:

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurden Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits-laserschweißen an alternativen Stoßarten mit 5 kW Monomode Faserlaser durchgeführt. Hierfür wurde speziell das Fügen von AlMg3 und Al99,5 (Stucco Design) mit Kehlnaht am Überlapp, sowie mit Bördelnähten (hier mit I-Naht am Kurzflansch und Kanteneinzug bezeichnet) untersucht. Die Schweißversuche sollten mit überlagerter/pendelnder Strahlführung und linearer Strahlführung durchgeführt werden.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
1.3 Kapitelübersicht.....	2
2 Entwicklung und Stand der Technik	5
2.1 Literaturrecherche	5
2.2 Vorangegangene Untersuchungen	6
3 Versuchsvorbereitungen	10
3.1 Versuchsaufbau	10
3.1.1 Strahlquelle	11
3.1.2 Optische Komponenten zur Strahlführung und –formung	11
3.1.3 Komponenten zur Strahlführung und –ablenkung	13
3.1.4 Zusätzliche Komponenten	14
3.1.5 Schutz- und Spannvorrichtungen	15
3.2 Strahlcharakteristika	19
3.2.1 Leistungsmessung	19
3.2.2 Strahlvermessung	19
3.2.3 Strahlengang	20
3.3 Charakterisierung der Schweißproben	21
3.3.1 Probenmaterial	21
3.3.1.1 X5CrNi18-10	21
3.3.1.2 AlMg3.....	22
3.3.1.3 Al99,5.....	24
3.3.2 Probengeometrie und Probenhandling	26
4 Experimentelle Untersuchungen.....	28

4.1	<i>Untersuchungen zur überlagerten Bahnbewegung</i>	28
4.1.1	Spaltüberbrückbarkeit	28
4.1.2	Konturform	28
4.1.3	Ermittlung des Frequenz-Spannungs-Äquivalents des Galvoscaners	29
4.1.4	Einfluss bei steigender Vorschubgeschwindigkeit und Leistung	34
5	Auswertung der Ergebnisse	35
5.1	<i>Charakterisierung der Schweißproben</i>	35
5.1.1	Sichtprüfung.....	35
5.1.2	Metallographische Untersuchungen	36
5.2	<i>Festigkeitsuntersuchungen</i>	40
5.2.1	Härtemessung.....	40
5.2.2	Zugprüfung	41
6	Zusammenfassung und Ausblick	44
	Quellenverzeichnis	47
	Anlagen	51
	Selbstständigkeitserklärung	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau	10
Abbildung 2: YLS - 10000-SM	11
Abbildung 3: Funktionsprinzip der Strahlablenkung mit 2 Scannern	13
Abbildung 4: Frequenzgenerator, Oszilloskop und Labornetzgerät.....	14
Abbildung 5: Anordnung von Cross-Jet, Absaugung und Spannelement.....	15
Abbildung 6: kleiner Spanntisch	17
Abbildung 7: Schraubstock.....	18
Abbildung 8: großer Spanntisch	19
Abbildung 9: Strahlengang	20
Abbildung 10: Gefüge X5CrNi18-10	22
Abbildung 11: Stucco Design [20].....	25
Abbildung 12: Geometrie L-Bleche	26
Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Pendelkontur [Wagner]	29
Abbildung 14: Sinus Kontur bei Beschriftungsversuch.....	29
Abbildung 15: Beschriftungsversuche	30
Abbildung 16: Frequenz-Spannungs-Äquivalent Zick-Zack bei 10 m/min	31
Abbildung 17: Nahtvergleich bei 30 m/min	34
Abbildung 18: Nahtfehler undichte Schweißnaht	35
Abbildung 19: Nahtvergleich zwischen Kanteneinzug (links) und Kurzflansch (rechts)	36
Abbildung 20: Vorbereitung Schliffproben der Kehlnähte	37

Abbildung 21: Schweißnahtfehler.....	38
Abbildung 22: Verschweißte Kehlnähte.....	38
Abbildung 23: aufgetretene Nahtfehler.....	40
Abbildung 24: Einspannung in Zugprüfmaschine	41
Abbildung 25: Aussehen der Zugproben	42
Abbildung 26: getrennte Zugprobe am KE	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung Arbeiten am LHM	9
Tabelle 2: Eigenschaften X5CrNi18-10.....	21
Tabelle 3: chemische Zusammensetzung X5CrNi18-10	22
Tabelle 4: Eigenschaften AlMg3	23
Tabelle 5: chemische Zusammensetzung AlMg3	24
Tabelle 6: Eigenschaften Al99,5	25
Tabelle 7: chemische Zusammensetzung Al99,5	26
Tabelle 8: Probengeometrie und Probenhandling.....	27
Tabelle 9: Vergleich der Spannungsformen bei steigender Geschwindigkeit.....	33

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
AOM	akkustooptischer Modulator
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Cw	Dauerstrichbetrieb
EOM	elektrooptischer Modulator
Fe	Eisen
Ga	Gallium
KE	Kanteneinzug
KF	Kurzflansch
KN	Kehlnaht
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Mo	Molibdän
N	Stickstoff
Nb	Niobium
Ni	Nickel
P	Phosphor
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
S	Schwefel
Si	Silizium
Ti	Titan
V	Vanadium
WEZ	Wärmeeinflusszone

Zn	Zink
----	------

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit der Entdeckung des Lasers hat er sich zu einem der flexibelsten Werkzeuge in der Wissenschaft und Industrie entwickelt. Nach dem Einsatz als Schneid- und Schweißwerkzeug hat sich die Lasertechnik in den letzten Jahrzehnten immer neue Anwendungsfelder erschlossen. Für den Einsatz in der Fügetechnik ist vor allem die enorm hohe Energiedichte, welche auf eine kleine lokale Wirkungszone fokussiert werden kann, von großer Bedeutung. Mit dieser Fähigkeit können schmale, fast parallele Nahtflanken erzeugt werden. Dieser Umstand sorgt für einen geringen Verzug, eine geringe Schwindung und eine geringe Temperaturbelastung der Bauteile, da die Wärmeeinflusszone kleiner gehalten wird. Die hohen Schweißgeschwindigkeiten und vor allem der gute Automatisierungsgrad in Verbindung mit der Robotertechnik sorgen heutzutage für ein breites Anwendungsfeld im Automobil- und Karosseriebau. Doch auch in Bereichen von Umwelt und Energie, Medizin und Messtechnik ist die Lasertechnik nicht mehr wegdenkbar.

Eine immer größere Bedeutung erlangt die örtliche Leistungsmodulation beim Laserstrahlschweißen. Durch eine die Vorschubbewegung überlagernde Pendel- oder Oszillationsbewegung ist die Spaltüberbrückbarkeit für Stumpfstoßschweißungen, sowie das Schweißen mit einer annähernd beliebigen Schweißnahtbreite möglich. Selbst als schwierig schweißbar geltende Werkstoffe, wie z.B. Kupfer, Aluminium oder verzinkte Stahlbleche sind durch die hohen erzielbaren Intensitäten von Faserlasern möglich. Die Verwendung von Strahloszillation führt zu einer Stabilisierung von Schweißprozessen zum Beispiel durch eine reduzierte Spritzerbildung. Die Steigerung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen von schwer schweißbaren Werkstoffen mit überlagerter Strahlführung weist ein hohes Entwicklungspotential auf.

Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Untersuchungen zum Verschweißen von Aluminiumblechen mit gependelter und linearer Nahtführung untersucht. Das Ziel ist unter möglichst hohen Schweißgeschwindigkeiten einen möglichst prozesssicheren Fügevorgang mit einem 5 kW Monomode Faserlaser zu realisieren. Außerdem sollen Lösungen zur Überwindung von auftretenden Nahtimperfectionen aufgezeigt werden.

1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitslaserstrahlschweißen mit einem Monomode Faserlaser und Laserstrahlleistungen bis zu $P_L = 5 \text{ kW}$ durchgeführt werden. Hierzu sollen Stoßarten, wie: Überlappstoß, I-Naht am Pfalz bzw. Kurzflansch oder Kehlnaht am Überlapp näher untersucht werden.

Vorangegangene Untersuchungen mit Schweißgeschwindigkeiten bis zu 120 m/min im Stumpfstoß haben gezeigt, dass es verschiedene Limitierungen gibt, die sich hinsichtlich der Schweißnahtbreite, der Spaltüberbrückbarkeit sowie auf die erreichbare Schweißnahtfestigkeit auswirken. In dieser Arbeit sollen neben den alternativen Stoßarten die prozesstechnischen Phänomene (Humping, Spiking, Poren, Spritzer) mit untersucht sowie auch Möglichkeiten zur Überwindung dieser Limitierungen erarbeitet werden.

Die Materialauswahl besteht aus dessinierten Aluminium Al99,5 (Stucco Design) in Verbindung mit AlMg3 (W19).

Die zu leistenden Arbeiten beinhalten die:

- Planung und Versuchsvorbereitung,
- Konstruktion/Versuchsaufbau,
- Laserstrahlcharakterisierung,
- Versuchsdurchführung sowie
- Auswertung der Schweißversuche sowie Zugversuche zum Festigkeitsnachweis

1.3 Kapitelübersicht

Die vorliegende Bachelorarbeit gliedert sich in folgende Kapitel:

Im **Kapitel 1** wird die Thematik dieser Arbeit präzisiert und die Motivation sowie die Zielstellung der durchgeführten Untersuchungen verdeutlicht.

Anhand der Literaturrecherche in **Kapitel 2** soll der Leser einen Einblick in die umfassenden Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsschweißen mit überlagerter Bahnbewegung bekommen. Außerdem wird ein Überblick über die bisherigen Untersuchungen am LHM aufgezeigt.

Anschließend wird im **Kapitel 3** auf die versuchsvorbereitenden Maßnahmen und verwendeten Werkstoffe und Komponenten eingegangen, um eine Wiederholgenauigkeit der Untersuchungen zu gewährleisten.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den experimentellen Untersuchungen zur Erstellung der geometrischen Konturformen. Anschließend werden die Parameter ermittelt, welche mit

dem Versuchsaufbau möglich waren. Es wird ein Überblick gegeben über die Parameter, welche für die zu erstellenden Schliff- und Zugproben verwendet wurden.

In **Kapitel 5** werden die Schweißnähte, die durch lineare oder pendelnde Strahlführung erzeugt wurden, zunächst anhand einer Sichtprüfung und der Überprüfung auf Schweißnahtunregelmäßigkeiten, mit Hilfe von Schliffbildern bewertet. Anschließend werden die erfolgversprechendsten Schweißnähte auf ihre Festigkeitseigenschaften in einem Zugversuch geprüft.

Abschließend werden im **Kapitel 6** die Ergebnisse aus den Untersuchungen zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen und Prozessverbesserungen gegeben.

2 Entwicklung und Stand der Technik

In diesem Kapitel soll ein kleiner Abriss über die stetig fortschreitenden Forschungen in dem Bereich der Hochgeschwindigkeitslaserbearbeitung, speziell dem Schweißen mit oszillierender und pendelnder Strahlführung, gegeben werden. Dazu werden Berichte aus der Literatur und Forschungsergebnisse am LHM getrennt betrachtet.

2.1 Literaturrecherche

Laserstrahl-Remote Schweißen

In Quelle [1] wird erläutert, dass neueste Entwicklungen im Bereich des Laserschweißens auf die Systemtechnik für hochfrequente Strahloszillation zurückgreifen. Neben dem Fügen artungleicher Materialien konzentrieren auch auf schwer schweißbare Verbindungen. Nur durch die Verwendung eines hochfrequent oszillierenden Laserstrahls konnte reproduzierbar und anforderungsgerecht ein Rohr aus einer Aluminium Knetlegierung mit einem Aluminium Druckguss Flansch verbunden werden. Die Anforderung bestand in der Dichtheit der Verbindung und somit die Unterbindung von Poren. Durch die Amplitude konnte das Keyhole vergrößert und mit Hilfe der Bewegung konnte die Ausgasungszeit der Schmelze verlängert werden. Somit wurde die Porenbildung reduziert und das Schmelzbad stabilisiert.

Remote-Schweißen für Kehlnähte

Aus [2] kann man entnehmen, dass ohne die Remote-Technik nur eine Fokussierung auf das Oberblech möglich ist beim Erzeugen einer Kehlnaht. Dadurch entsteht eine I-Naht am Überlapp mit erhöhter Spritzerbildung. Kehlnähte sind mit der Remote-Technik prozesssicher schweißbar, indem eine vorlaufende Lichtschnittsensorik kontinuierlich den Fügestoß erfasst. Der Laserstrahl wird unabhängig vom Roboterarm genau dorthin abgelenkt wo sich die Fuge befindet. Ungenaue Roboterprogrammierung und Werkstücktoleranzen verlieren somit ihren Schrecken.

Ebenfalls wird in [2] die Spaltüberbrückbarkeit untersucht. Spaltüberbrückung mit Zusatzdraht ist Stand der Technik. Der Einsatz von Zusatzdraht bei der Remote Technik ist auf Grund der Randbedingungen kaum möglich. Die Überbrückung eines Höhenversatzes/Spalt muss schließlich präzise vom Oberblech abgeschmolzen werden. Durch Strahloszillation wird Werkstoff vom Oberblech abgeschmolzen und in Richtung des Un-

terblechs transportiert. Durch eine Anpassung der Schwingungsamplitude kann die Schmelzbadbreite an den Fügespalt angeglichen werden. Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, die Spotgröße kleiner als beim konventionellen Laserstrahlschweißen zu wählen. So steigt die Energieeffizienz der zur Schmelzbadbildung genutzten Leistung.

Simulation der Nahtform durch örtliche Leistungsmodulation

Aus [3] konnte durch eine die Vorschubbewegung überlagernde Oszillation die mittlere Rauheit einer Naht einer Kupferlegierung um 70% reduziert werden. Außerdem konnte ein dreifacher Anbindungsquerschnitt, im Gegensatz zum konventionellen Laserstrahlmikroschweißen, erzeugt werden. In [4] wurde ebenfalls die örtliche Leistungsmodulation beim Schweißen von schwierig schweißbaren Kupferwerkstoffen untersucht. Beobachtungen der Schmelzbaddynamik haben ergeben, dass die dominierende Bewegung des Laserstrahls die Nahtformung maßgeblich beeinflusst. Es wird eine Steigerung der Effizienz festgestellt, da Bereiche höherer thermischer Energie nochmals überfahren werden und so ein größeres Materialvolumen aufgeschmolzen wird.

2.2 Vorangegangene Untersuchungen

Masterarbeit Schwind

In dieser Arbeit sollte ein prozesssicheres Parameterfenster erarbeitet werden, in dem mit einem 3 kW Monomode Faserlaser die größtmögliche Schweißgeschwindigkeit erreicht werden kann. Als Nahteigenschaft werden humpingfreie und vollständig durchgeschweißte Schweißnähte im Stumpfstoß vorausgesetzt. Dazu wurden die Stähle X5CrNi18-10 und 22MnB5 in den Materialstärken von 1 mm bis 3 mm verwendet. In den grundlegenden Untersuchungen wurden mit einem Galvanometerscanner und 2 Fokussieroptiken mit unterschiedlichen Brennweiten erste Parameter untersucht. Die Optik mit einer Brennweite von 500 mm erzeugte einen Fokusedurchmesser von 65 μm und konnte mit einer Schweißgeschwindigkeit von 330 mm/s 2mm starke X5CrNi18-10 Bleche verschweißen. Mit der 230 mm Brennweite wurde ein 21 μm großer Fokusedurchmesser erreicht, aber es konnte keine humpingfreie Schweißung realisiert werden. In weiteren Untersuchungen wurde die Schweißbeignung bei stechender und schleppender Prozessführung mit einer 250 mm Optik (Fokusedurchmesser 53 μm) untersucht. Eine stechende Einstrahlung ermöglichte eine deutlich höhere Schweißgeschwindigkeit. Durch den Einsatz einer Cross-Düse konnte die beim Lasertiefschweißen entstehende Dampfplasmafackel minimiert und senkrecht zur Vorschubrichtung abgelenkt werden. Somit konnte die Schweißgeschwindigkeit weiter erhöht werden. Das Resultat waren Geschwindigkeiten von 400 mm/s für 2 mm starken X5CrNi18-10, 800 mm/s für 1mm starken X5CrNi18-10 und 300 mm/s für den 1,6 mm starken borlegierten Werkstoff. Mit Hilfe von Stickstoff konnten oxidationsfreie Nähte am Werkstoff X5CrNi18-10 erzeugt werden. Zur Festigkeitsuntersuchung wurde eine Mikrohärtemessung vorgenommen. Der 22MnB5 wies eine deutliche Aufhärtung in der Schweißnaht und einen deutlichen Härteabfall in der WEZ auf. Der X5CrNi18-10 zeigte nur

einen leichten Härteanstieg. Anhand von Zugversuchen wurde festgestellt, dass der 22MnB5 entlang der Naht bricht und fast eine ähnlich hohe Zugfestigkeit wie der Grundwerkstoff besaß. Beim X5CrNi18-10 war die Zugfestigkeit der Schweißverbindung größer als im Grundwerkstoff, weshalb die Proben schon im Grundwerkstoff brachen[5].

Diplomarbeit Wagner

Das Ziel dieser Diplomarbeit war das schnellstmögliche Schweißen von hochfesten Stählen mit Überlagerung des Laserspots (wobbeln, pendeln) zu erreichen. Möglichkeiten zur Beeinflussung der Dampfplasmafackel sollten dabei untersucht und eine Cross-Düse verwendet werden. Abschließend sollten Schliffe angefertigt und Zugversuche durchgeführt werden. Es wurde ein Galvanometerscanner für Vorschub- und Pendelbewegung genutzt. Dieser wurde mit Hilfe eines Steuerprogramms bedient. Bei der Erzeugung von Wobbelkonturen ergaben sich Bahngeschwindigkeiten von 2 m/s bis 3,25 m/s und somit Vorschubgeschwindigkeiten von 0,25 m/s bis 0,40 m/s. Bei gependelter Strahlführung ist die Geschwindigkeit abhängig von der Pendelbreite und Schrittweite. Die Schrittweite wurde auf 225 µm begrenzt. Hier wurden Bahngeschwindigkeiten von 0,38 m/s bis 1,12 m/s und die maximale Vorschubgeschwindigkeit von 0,78 m/s bei einer eingestellten Bahngeschwindigkeit von 8 m/s erreicht. Daraus geht hervor, dass pendelnde Strahlführung eine höhere Vorschubgeschwindigkeit ermöglicht, da die erzeugte Bahnlänge im Vergleich zum Oszillieren geringer ist. Anhand von Blind- und Stumpfstoßschweißungen wurden die Durchschweißgeschwindigkeiten für die untersuchten Werkstoffe und Materialstärken ermittelt. Für das Schweißen von 22MnB5 war der Einsatz einer Cross-Düse notwendig und bei X5CrNi18-10 führte der Einsatz je nach Materialstärke zu einer Geschwindigkeitserhöhung von 4 bis 30 % ($v_f = 0,69$ m/s bei $s = 1,0$ mm, $v_f = 0,60$ m/s bei $s = 1,5$ mm und $v_f = 0,46$ m/s bei $s = 2,0$ mm). Für den borlegierten Stahl mit einer Stärke von 1,6 mm ergab sich eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 0,32 m/s. Bei allen Nähten zeigte sich eine gleichmäßige und humpingfreie Nahtoberseite, aber auch ein leichter Wurzelrückfall. X5CrNi18-10 wies bei den Materialstärken von 1 mm bis 1,5 mm Nahtunterwölbung auf. Bei der Härtemessung wurde beim X5CrNi-18-10 ein breiterer Bereich der Aufhärtung um die Schweißnaht als bei Schwind [5] verzeichnet. Dies ist auf die breitere Intensitätsverteilung der pendelnden Strahlführung zurückzuführen. Der 22MnB5 zeigte keine sonderliche Veränderung der Härtewerte als bei Schwind [5]. Die Untersuchungen zeigten, dass Schweißen mit pendelnder Strahlführung Potential hat, aber um schneller zu Schweißen ist die Aufteilung der Bewegung auf mehrere Komponenten ratsam. Durch Steigerung der Frequenzen wird ebenfalls eine größere Geschwindigkeit und Einschweißtiefe vermutet.[6]

Bachelorarbeit Barth

In dieser Arbeit wird das Hochgeschwindigkeitsschweißen mit einem 3 kW Monomode Faserlaser weiter untersucht, indem man eine Geschwindigkeitserhöhung durch einen zusätzlichen Spiegel mit Galvanometerantrieb, welcher eine sinusförmige Pendelbewegung senkrecht zur Vorschubrichtung ausführt. Angestrebt wurden Pendelfrequenzen von

10 kHz bei einer Pendelbreite von über 150 μm . Ziel dabei war es Geschwindigkeiten von 120 m/min zu erreichen, ohne unzulässige Nahtfehler zu erzeugen. Es konnte eine Verminderung der Porenbildung erreicht werden und es hat sich herausgestellt, dass ein Galvanometer ohne Softwaresteuerung schneller arbeiten kann. Der Galvanometer ermöglichte eine Pendelfrequenz bis 8 kHz. Die erzeugten Nahtoberflächen waren nahezu frei von Fehlern wie Humping, aber Spiking an der Nahtunterseite konnte nicht verhindert werden. Die geforderte Schweißgeschwindigkeit von 120 m/min konnte nur im Zusammenhang mit Nahtfehlern realisiert werden. Es hat sich herausgestellt, dass bei niedrigen Pendelfrequenzen breite Pendelbreiten möglich sind und mit anderen Galvanometern noch höhere Frequenzen realisierbar sind. In den Querschliffen stellte man bei einer Optik mit einer 500 mm Brennweite und einer Geschwindigkeit von 120 m/min vermindert Risse fest, da es eine größere Wärmeeinflusszone zur Folge hatte. Allerdings konnte kein stabiles Prozessfenster für diese Geschwindigkeit gefunden werden.[7]

Diplomarbeit Morgenstern

Herr Morgenstern untersuchte das Hochgeschwindigkeits- Laserstrahlschweißen mit 3 kW Singlemode Faserlaser und einem eigens konstruierten Schweißkopf, sowie einer Linearrachse für die Vorschubbewegung. Es wurden Zusammenhänge der lokal begrenzten Wirkungszone des Laserstrahls und der Spaltüberbrückung von Proben mit lasergeschnittenen Kanten (Oberflächenrauheit von 30 - 50 μm) beschrieben. Mit Hilfe von modernen Scannersystemen ist es nun möglich Fügespalte von bis zu 100 μm wirksam zu überbrücken. Es wurde die Amplitude der sinusförmigen Pendelbewegung anhand der Variation des Frequenz-Spannungs-Verhältnisses dahingehend beeinflusst, dass eine Amplitude von ca. 125 μm reproduzierbar erreicht wurde. Anhand von Mikrohärtemessungen wurde festgestellt, dass X5CrNi18-10 keine signifikante Aufhärtung im Schweißgut gegenüber dem Grundwerkstoff erfährt, aber dass DC04 eine deutliche Aufhärtung in der WEZ und eine noch höhere im Schweißgut aufweist. Die Schweißgeschwindigkeit sinkt exponentiell mit steigender Materialdicke. Beim X5CrNi18-10 konnte eine im Schnitt 10 m/min schnellere Schweißgeschwindigkeit als beim DC04 erreicht werden. Bei Blechstärken mit 1 mm oder kleiner wirkte sich eine pendelnde Strahlführung und eine angewinkelte Lasereinstrahlung negativ aus. Bei 1,5 mm starken Blechen wurde beim X5CrNi18-10 88 % Festigkeit des Grundwerkstoffes bei senkrechter Einstrahlung und einer Geschwindigkeit von 50 m/min erreicht, während der DC04 die besten Werte bei 45° Einstrahlung und Pendelbewegung die besten Eigenschaften aufwies. Aufgrund des besseren Verhältnisses zwischen Fügespalt und Materialdicke übertrafen die Werte der 2 mm Bleche sowohl bei senkrechter als auch bei 45° Einstrahlung die des Grundwerkstoffes. Die 25° Einstellung hatte ein nichtlineares Verhalten und stellt somit den Übergangsbereich von senkrechter Einstrahlung mit linearer Bahnbewegung und 45° Einstrahlung mit pendelnder Bahnbe-
wegung dar. [8]

Eine Zusammenfassung der vorangegangenen Arbeiten und ein Ausblick auf die hier vorliegende Arbeit gibt die beigefügte Tabelle 1. Die Bördelnähte werden in dieser Arbeit als I-Naht am Kurzflansch und I-Naht am Kanteneinzug benannt, um eine bessere Unterscheidbarkeit zu gewährleisten.

Arbeiten	Schwind	Wagner	Barth	Morgenstern	Hanelt
Geräte	Schweißoptik mit Linearchssystem für Vorschub	Galvanometerscanner + F-Theta-Optik	Galvanometer + „Galvospiegel“	Galvanometerscanner + Linearchssystem für Vorschub	Galvanometerscanner für vf + Galvanometerscanner für Pendelbewegung
Strahlführung	Linear	Pendeln + Wobbeln (Frequenzen < 1,8 kHz)	Pendeln (Frequenzen bis 4 kHz)	Pendeln (Frequenzen bis 8 kHz)	Pendeln (Frequenzen bis 8 kHz) + Linear
Laserleistung	< 3 kW				4 – 5 kW
Vorbereitung	geschliffene Proben	lasergeschnittene Proben			
Nahtarten	Stumpfstoß				Kehlnaht am Überlapp, Bördelnähte

Tabelle 1: Zusammenfassung Arbeiten am LHM

3 Versuchsvorbereitungen

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der Voruntersuchungen, sowie der Schweißversuche ist Abbildung 1 zu entnehmen. Der Aufbau besteht aus den optischen Komponenten zur Strahlführung und -formung, der Schutz- und Spannvorrichtung, sowie dem Kamerasystem. Ebenfalls im Versuchsraum separat aufgestellt, befinden sich Frequenzgenerator, Oszilloskop und die Spannungsversorgung für den Galvanometerscanner 2 (Vorschubbewegung). Die Strahlquelle und der Steuerrechner befinden sich außerhalb der Schutzumhausung der Laseranlage und sind daher nicht abgebildet. Die Galvanometerscanner wurden nach der Reihenfolge des Strahlengangs nummeriert um nicht verwechselt zu werden. Der Scanner 1 und der Umlenkspiegel sind durch die Anordnung verdeckt und deshalb nicht zu sehen.

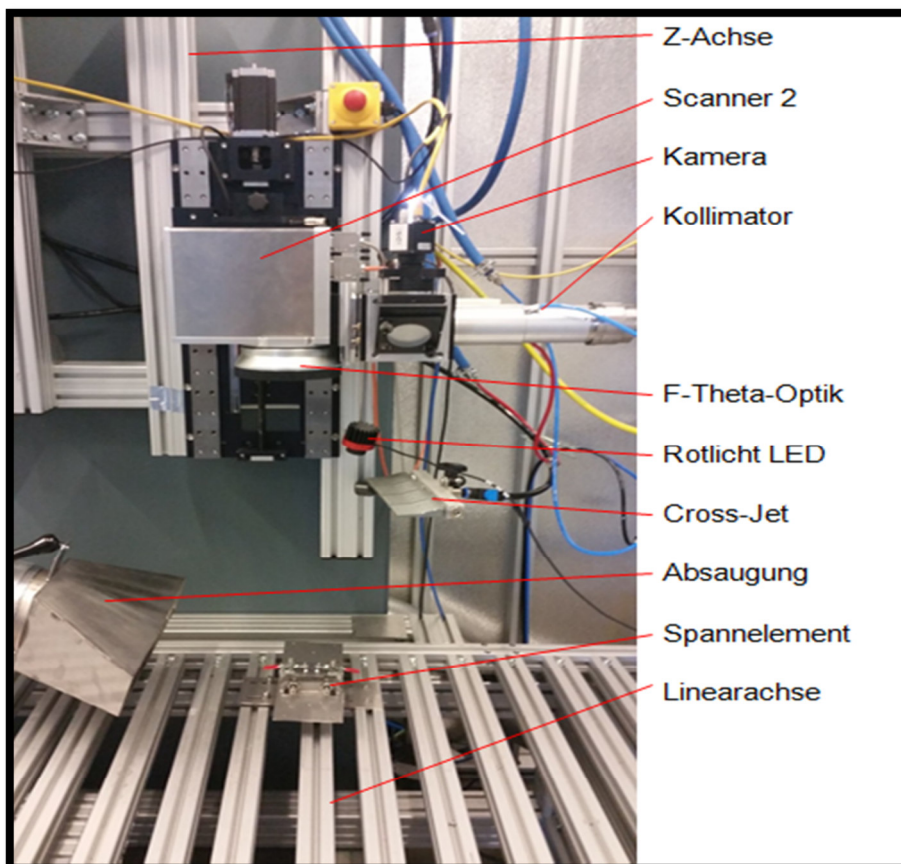


Abbildung 1: Versuchsaufbau

3.1.1 Strahlquelle

Für die durchgeführten Schweißversuche wurde der YLS-10000-SM Faserlaser der Firma IPG Photonics mit der Seriennummer 15048851 verwendet, wie er in Abbildung 2 zu sehen ist. Diese Laserquelle ist speziell für die Integration in andere Maschinen konzipiert und ihre Einsatzmöglichkeiten sind sowohl industrielle Anwendungen wie Schweißen, Bohren und Präzisionsschneiden, als auch in Forschungsbereichen. Der wassergekühlte Ytterbium Faserlaser emittiert eine durchschnittliche Leistung von 10 kW bei einer Wellenlänge von 1070 nm bis 1080 nm und kann in CW (Dauerstrichbetrieb) oder in modulierten Modi (Pulsbetrieb) bei einer Modulationsrate von 5 kHz arbeiten. Die Laserstrahlung wird in den Lasermodulen erzeugt. Jedes Lasermodul kann als eigenständiger Laser verstanden werden und hat typenabhängig eine Ausgangsleistung zwischen 400 W und 1200W. Entsprechend der gewünschten nominalen Ausgangsleistung des Gerätes, wird die Anzahl an Lasermodulen im Laser bestimmt. Der Leistungsbereich liegt zwischen 100 W und 10000 W und die Strahlqualität wird mit der Beugungsmaßzahl $M^2 = 1,5$ (typisch) bis maximal 2,0 angegeben. Es ist allerdings von einer Beugungsmaßzahl unter 1,5 auszugehen.[9]



Abbildung 2: YLS - 10000-SM

3.1.2 Optische Komponenten zur Strahlführung und -formung

Kollimator

Zur Parallelisierung und zum Richten der aus dem Faserkabel geleiteten Laserstrahlung wurde ein Kollimationsmodul der Firma IPG Photonics mit einer Brennweite von 160 mm

verwendet. Der somit erzeugte Rohstrahldurchmesser beträgt 16 mm bei 86 % Einbringung der applizierten Intensität.

Umlenkspiegel

Zur Vollständigkeit der optischen Komponenten zur Strahlführung wird der verwendete Umlenkspiegel hier mit aufgeführt. Seine Aufgabe besteht darin den parallelisierten Laserstrahl vom Kollimator um 90° verlustarm auf den 1. Galvanometerscanner zu lenken. Die Position des Umlenkspiegels wird in 3.2.3 Strahlengang näher beschrieben.

1. Galvanometerscanner (Pendelbewegung)

Der Scanner zur Erzeugung der Pendelbewegung ist ein 1-Achs-Strahlumlenksystem der Firma Raylase mit 30 mm Apertur. Seine Aufgabe ist die Ablenkung des Laserstrahls durch die Pendelung des Spiegels. Dadurch wird eine gependelte Konturform/Wobbelkontur der Schweißnaht erzeugt. Der eingebaute Spiegel besitzt eine SiC-Beschichtung und hat eine geringe Masse, um große Massenträgheitsmomente zu vermeiden. Diese Eigenschaft des Spiegels ist maßgeblich für die Ausführung von hohen Pendelfrequenzen. Angesteuert wird dieser Galvanometerscanner mit Hilfe des Frequenzgenerators Rigol DG 2021A. Auf genauere Angaben musste verzichtet werden, da das dazugehörige Datenblatt nicht auffindbar war.

2. Galvanometerscanner (Vorschub)

Bei dem verwendeten Galvanometerscanner für die Vorschubbewegung handelt es sich um den 2-Achs-Scanner intelliSCANde® 30 (Art.Nr. 124460) der Firma SCANLAB. Die Hauptaufgabe dieses X-Y-Scan-Kopfs besteht darin, den Laserstrahl in X-Y-Richtung abzulenken und auf die Arbeitsfeldebene zu fokussieren. Die Ablenkung wird mit Hilfe von zwei verkippbaren Spiegeln realisiert (siehe Abbildung 3). Anhand dieser Abbildung wird das Zwei-Scanner-Prinzip erklärt. Der Strahl tritt über die 30 mm Eintrittsapertur in den Scan-Kopf ein und wird zuerst durch den Spiegel 1, der am Galvanometerscanner 1 befestigt ist, in Y-Richtung abgelenkt. Anschließend wird der Strahl durch Spiegel 2 an Galvanometer-Scanner 2 in X-Richtung abgelenkt. Die Ablenkwinkel können durch Positionierung der Galvanometer-Scanner präzise und hochdynamisch eingestellt werden.

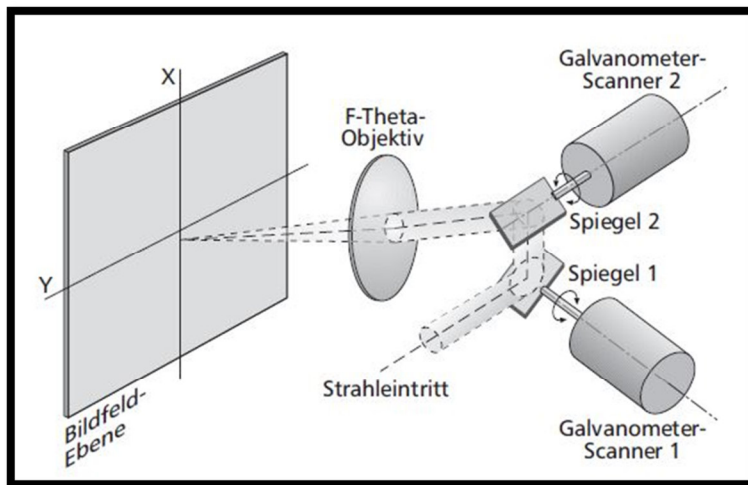


Abbildung 3: Funktionsprinzip der Strahlablenkung mit 2 Scannern

Die Spiegel besitzen eine dielektrische Hochleistungsschicht aus SiC und sind für Wellenlängen von 1070 nm – 1085 nm ausgelegt.[Quelle Handbuch] Außerdem verfügen die Spiegel über sehr gute Reflexionseigenschaften und sind außerdem hinsichtlich Massenträgheitsmoment, Steifigkeit sowie Ebenheit optimiert. Die Ablenkspiegel werden mit Druckluft und die Eintrittsapertur sowie die Elektronik mit Wasserkühlung abgekühlt [10].

F-Theta-Optik

Die Aufgabe der Optik ist die Fokussierung des Rohstrahls auf die Bildfeldebene und wird durch eine Scan-Linse an der Strahlaustrittsöffnung erreicht. Dafür wurde die F-Theta-Optik S4LFT1500/328 der Firma SILL Optics mit einer Brennweite von $f = 500$ mm verwendet. Diese Optik ist für Wellenlängen zwischen $\lambda = 1030$ nm und $\lambda = 1090$ nm ausgelegt. Die maximale Scanfläche der Optik beträgt 340×340 mm bei einem Arbeitsabstand von 569.8 mm [11].

3.1.3 Komponenten zur Strahlführung und –ablenkung

Frequenzgenerator Rigol DG 2021A

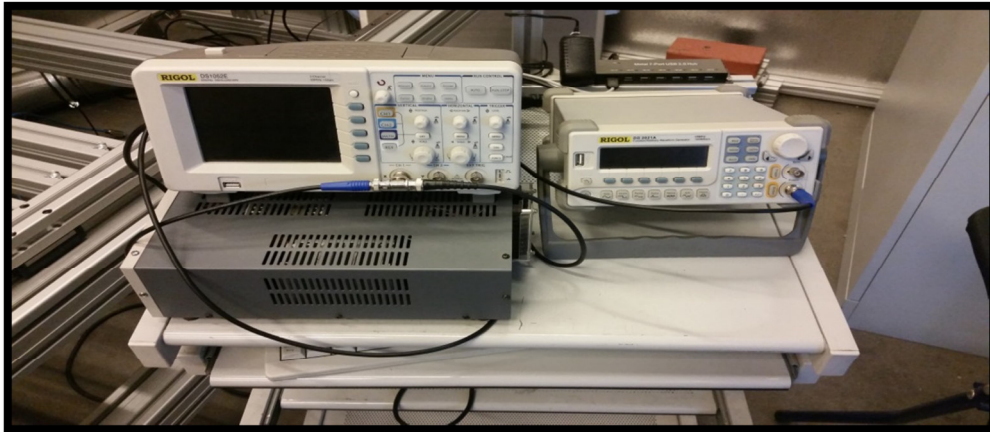
Das Rigol DG2021A (siehe in Abbildung 4) ist ein Funktionsgenerator (Arbitrary Waveform Generator) zur Erzeugung hochwertiger Ausgangssignale bis 25 MHz (Sinus). Es ist ebenfalls möglich Rampe, Rechteck und Puls Signale zu generieren. Der Frequenzbereich liegt bei Sinus zwischen 1 μ Hz - 25 MHz und bei Rampe (Zick-Zack) zwischen 1 μ Hz - 250 KHz. Die Auflösung beträgt 1 μ Hz. Der Spannungsbereich bzw. die Amplituden liegen bei 20 mVpp ~ 5 Vpp (50 Ω) und 40 mVpp ~ 10 Vpp (hochohmig) [12].

Das Signal wird mit Hilfe eines BNC-Kabels direkt an die Treiberkarte des Galvanometer-scanners für die Pendelbewegung übertragen. Zur Kontrolle der Spannung wird zwischen dem Frequenzgenerator und der Treiberkarte ein Oszilloskop geschaltet.

Oszilloskop DS 1052E

Das Rigol DS1052E ist ein hochwertiges Zweikanal Digital-Oszilloskop mit einer Bandbreite von 50 MHz und einer Abtastrate von 1 GSa/s. [13]

Um Störsignale zu dämpfen wurde am Ende des Kabels vom Oszilloskop zur Treiberkarte ein 50 Ω -Widerstand verbaut. Dadurch müssen die am Frequenzgenerator eingestellten Spannungen für die Ermittlung der realen Spannungen halbiert werden.



Oben links: Oszilloskop; unten links: Labornetzgerät; rechts: Frequenzgenerator

Abbildung 4: Frequenzgenerator, Oszilloskop und Labornetzgerät

3.1.4 Zusätzliche Komponenten

Kamera

Die UI-5490SE mit dem 10 Megapixel CMOS-Sensor (MT9J003STM/STC) von ON Semiconductor liefert mit einer Auflösung von 3840x2748 Pixeln jedes Detail bei bester Bildqualität. Sie findet Anwendungen in der Mikroskopie und Medizintechnik. Mit der IDS Software Suite ist sie vom Steuerrechner bedienbar [14].

Bei den Versuchen dient die UI-5490SE zur Ausrichtung der Proben auf den Spannvorrichtungen. Die integrierte Digitalkamera positioniert den Laserstrahl mittig auf den Probenspalt und richtet diesen über die gesamte Probenlänge aus. Mit Hilfe eines Fadenkreuzes wird das Kamerabild mit dem realen Laserstrahlverlauf abgeglichen und somit ausgerichtet.

Labornetzgerät

Für die Spannungsversorgung des 2. Galvanometerscanners wurde das Labornetzgerät VSP 2403 vom Hersteller VOLTcraft genutzt. Es befindet sich in Abbildung 4 unten links auf dem Labortisch. Das Netzgerät verfügt über 3 Ausgänge. Man kann Spannun-

gen von 0,1 V bis 40 V/DC und einen Ausgangstrom von 3 A einstellen [15]. Daher eignet es sich für die Versorgung des 2. Scanners.

3.1.5 Schutz- und Spannvorrichtungen

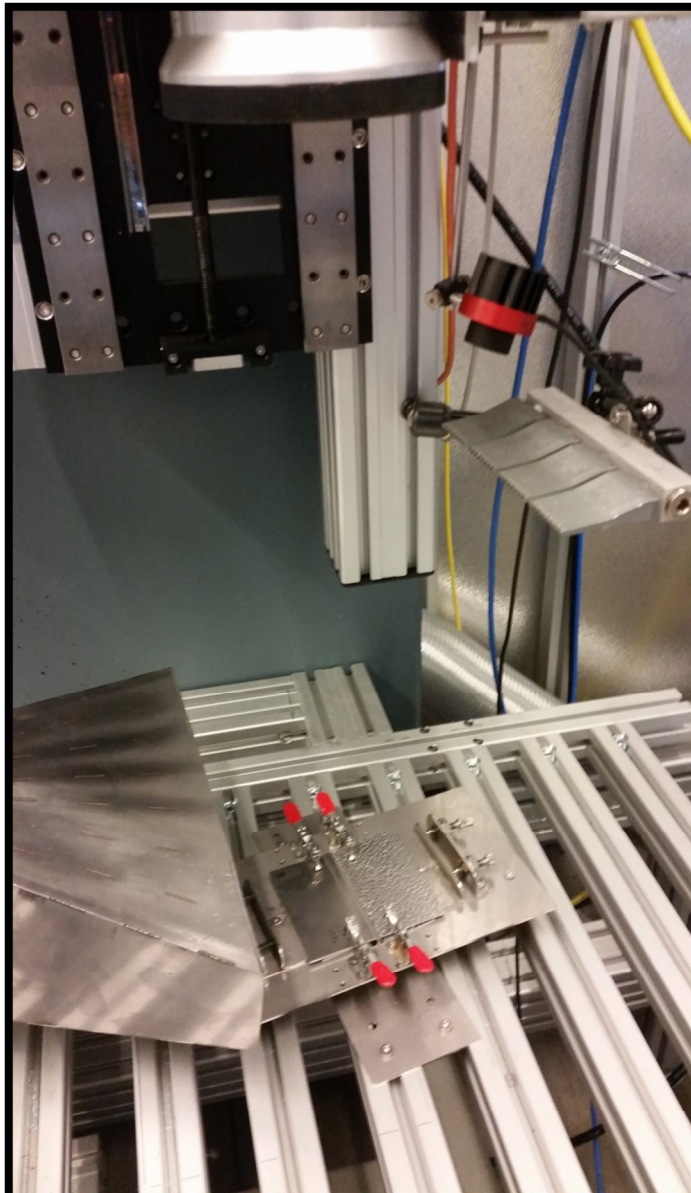


Abbildung 5: Anordnung von Cross-Jet, Absaugung und Spannelement

Cross Jet

Bei dem sogenannten Cross-Jet handelt es sich um eine Düsenanordnung, die einen breit gefächerten Luftstrom, oberhalb des Werkstücks bzw. Probenmaterials erzeugt. Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, wurden hierfür vier Flachstrahldüsen der Firma Silvent, vom Typ 920, verwendet. Der Zweck dieses Luftstroms ist der Schutz, der für die Schweißversuche verwendeten Komponenten, respektive der F-Theta-Optik vor zurückgeworfenem Material (Schweißspritzern, Funken oder Schmauch) während der Bearbeitung [6].

Absaugung

Durch die Laserbearbeitung werden Metallstäube und Feinstäube frei, welche unter Umständen giftig sind oder Atemwegserkrankungen hervorrufen können. Die verwendeten Komponenten können durch die Rauchbelastung Schaden nehmen, verschmutzen und

die Arbeitsqualität nimmt extrem darunter ab. Es sind aber auch chemische Reaktionen von Maschinen mit dem Laserdampf möglich. Deshalb ist eine Absaugung und Filterung dringend notwendig um Mensch und Maschine zu schützen. In Abbildung 5 ist die genaue Anordnung der Absaugung neben dem Fügespalt zu erkennen.

Spannvorrichtungen/Probenhalterungen

Im Vorfeld der Versuchsdurchführungen war es notwendig Spannvorrichtungen zu erstellen, welche die geplanten Schweißversuche ermöglichen. Für die Kehlnähte an den 50 x 50 mm Blechen wurde ein „kleiner Spanntisch“ (siehe Abbildung 6) ähnlich einer vorhandenen Vorrichtung entworfen, per TLC- Schneidmaschine lasergeschnitten und schließlich montiert. Für die Schweißungen an den L-Blechen (I-Naht am Kurzflansch und I-Naht am Kanteneinzug) wurden spezielle Spannbacken (siehe Anlage A1) gefräst um die Einspannung mit Hilfe eines Schraubstocks (siehe Abbildung 7) zu realisieren. Zur Durchführung der Zugversuche stellte sich heraus, dass die bisher entwickelten Spannvorrichtungen auf Grund größerer Geometrien der Proben und somit einer anderen Einspannung der Proben ungeeignet waren. Deshalb wurde schließlich die dritte Spannvorrichtung „großer Spanntisch“ (siehe Abbildung 8) konzipiert und gefertigt. Sie wurde speziell für die Zugversuche konstruiert, ermöglicht aber alle Stoßarten.

Das Hauptaugenmerk der Probenhalterungen lag auf einer definierten Positionierung der zur Verwendung stehenden Probenbleche um genaue I-Naht- und Kehlnahtschweißungen zu ermöglichen. Dies ist wichtig, da die Körperkanten der Proben lasergeschnitten und somit nicht vorbehandelt sind. Die Möglichkeit die Spannvorrichtungen auf der darunter befindlichen Linearachse zu positionieren und zu fixieren musste ebenfalls berücksichtigt werden. Bei den Beschriftungsversuchen hat sich herausgestellt, dass die Spannvorrichtungen mit einer Winkelverschiebung von ca. 10° auf der Linearachse aufgeschraubt werden mussten, um mit dem Laserstrahl die Fügezone abfahren und die Pendelbewegung gleichmäßig erzeugen zu können. Dies lässt sich leicht mit der Kamerasoftware kontrollieren. Obwohl bei den Versuchen keine Cross-Düse verwendet wurde, sollte Die Verspannung eine niedrige Höhe aufweisen, um eventuell für weiterführende Untersuchungen mit Cross-Düse einen gewissen Abstand zwischen dieser und dem Keyhole mit der Dampf-Plasmafackel gewährleisten zu können. Bei der Erstellung der nötigen Halterungen wurde darauf geachtet, dass Elemente aus vorherigen Studentenarbeiten übernommen wurden um Material bzw. Kosten und Arbeitszeit zu sparen. So wurden die Einstellschrauben, welche eine mikrometergenaue Justage und eine Winkelverschiebung von $\pm 7,5^\circ$ zur X-Achse (Strahlvorschubrichtung) ermöglichen, übernommen. Ebenso wurden die Vertikalschnellspanner vom Typ 225-U der Firma Destaco verwendet. Diese besitzen eine mit $F = 2220 \text{ N}$ ausreichend hohe Klemmkraft um horizontales Verrutschen der Probenbleche zu verhindern [16]. Wie aus vorangegangenen Arbeiten bekannt wurden die Andruckspindeln vom Typ 225208-M mit einem Neopren-Kopf durch den Typ 507206-M mit einem

Kopf aus verzinkten Stahl ersetzt, da diese nicht für Bearbeitungen mit hohen Temperaturen geeignet waren.

Zur exakten Positionierung der Proben für die Schweißungen müssen folgende Schrittfolgen für den Spannvorgang eingehalten werden:

Schliffproben:

Die Kehlnähte wurden mit Hilfe des kleinen Spanntisches realisiert, indem die AlMg3 Probe (untere) per Hand gegen den Schieber gedrückt und eingelegt wird. Das Al99,5 Blech wird nun mit einem definierten Abstand durch das Distanzblech darüber gelegt. Durch die Einstellschrauben kann dieses nun noch genauer ausgerichtet werden, während man die Position des Fügespalt unter Hilfenahme der Kamertechnik kontrollieren kann. Die ermittelte Anordnung wird abschließend mit den Vertikalspannern fixiert.

Die Probenbleche für die Beschriftungsuntersuchungen wurden ebenfalls auf diesem Spanntisch realisiert. Dafür war allerdings nur ein Anschlag zum Einlegen der Bleche notwendig, da diese Beschriftungen keine definierte Position benötigen. Nach der Schweißspur wurde das Blech verschoben um neue Parameter zu fahren. Es musste nur darauf geachtet werden, dass der Arbeitsabstand für den fokussierten Laserstrahl gleich bleibt, indem man entsprechende Blechstärken unterlegt.

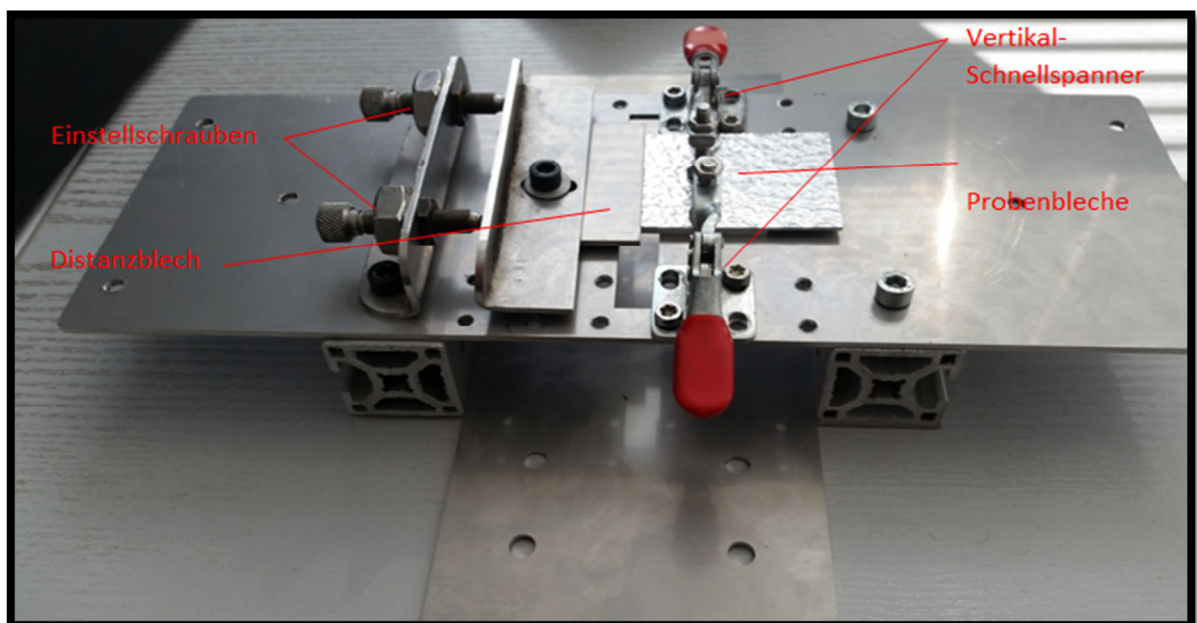


Abbildung 6: kleiner Spanntisch

Mit Hilfe des Schraubstockes wurden die Bördelnähte geschweißt. Die Spannbacken wurden so gefertigt, dass die L-Bleche auf der planen Fläche des Schraubstockes zwischen den Spannbacken aufliegen. So ist stets der gleiche Arbeitsabstand gegeben und eine variable Einlegbarkeit dieser geformten Proben. Nach dem Einlegen wird die Spindel festgezogen und stellt so einen geringen Fügespalt sicher. Durch ein 0,5 mm dickes Zwi-

schenblech wurde ein gleicher Anpressdruck über die Probenhöhe erreicht. Der Schraubstock wird wieder mit Hilfe der Kamera auf der Linearachse ausgerichtet und aufgeschraubt.

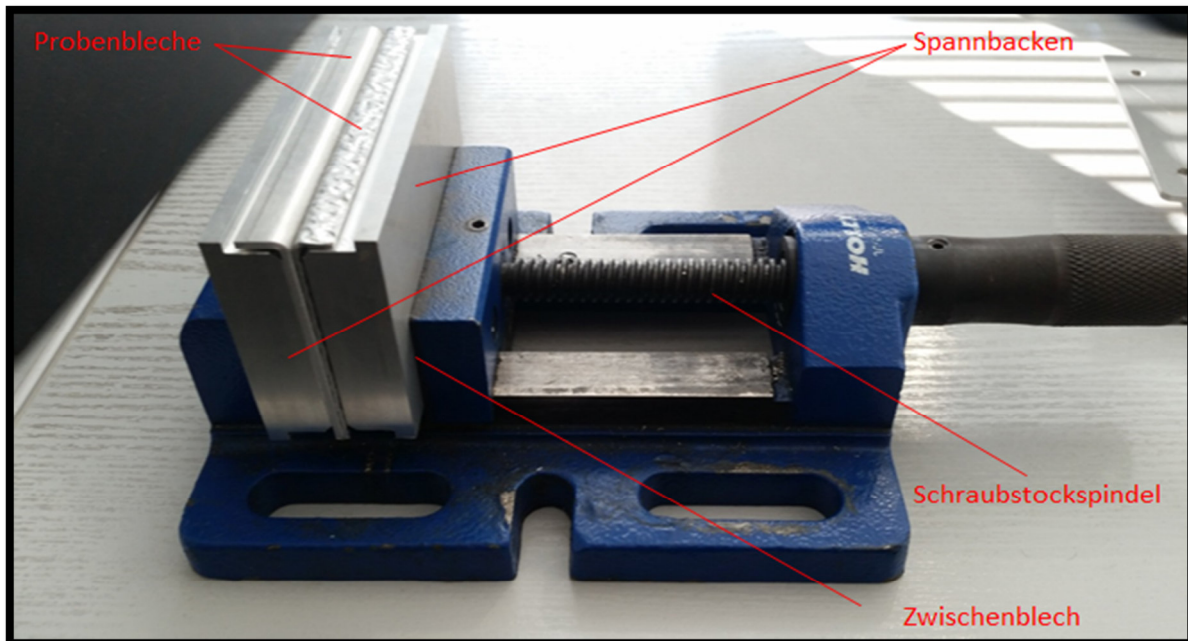


Abbildung 7: Schraubstock

Zugversuchproben:

Für die I-Nähte am Kurzflansch wird das AlMg3 L-Blech bei der Federseite eingelegt. Anschließend wird das Gegenblech zwischen dem Eingelegtem und dem Schieber mit Einstellschrauben gedrückt. Schließlich werden beide durch die Spanner fixiert. Da die Proben unterschiedliche Stärken aufweisen benötigt das Al99,5 Blech ein selbiges als Unterlage. Der Fügspalt wird mit Hilfe der Kamera kontrolliert und kann durch die Stellschrauben korrigiert werden.

Um Nähte am Kurzflansch zu schweißen, werden die Proben mit der Unterseite nach oben eingelegt und der gleiche Spannvorgang wie oben genannt wird durchgeführt. Auf Unterlegbleche kann hierbei verzichtet werden.

Für Kehlnahtschweißungen müssen die Einstellschrauben mit Schieber und die Gegenseite (Feder mit Schieber), wegen den größeren Geometrien der Proben, nach außen versetzt werden. Zuerst wird die AlMg3 Probe eingelegt und anschließend die andere Probe darüber. Die Al99,5 Probe benötigt wieder ein Unterlegblech und kann anhand der Kamera mit den Einstellschrauben positioniert werden. Schließlich wird mit den Spannern fixiert um ein Verrutschen zu verhindern. Allerdings konnten die Kehlnähte für Zugversuchproben aus zeitlichen Gründen nicht mehr realisiert werden.

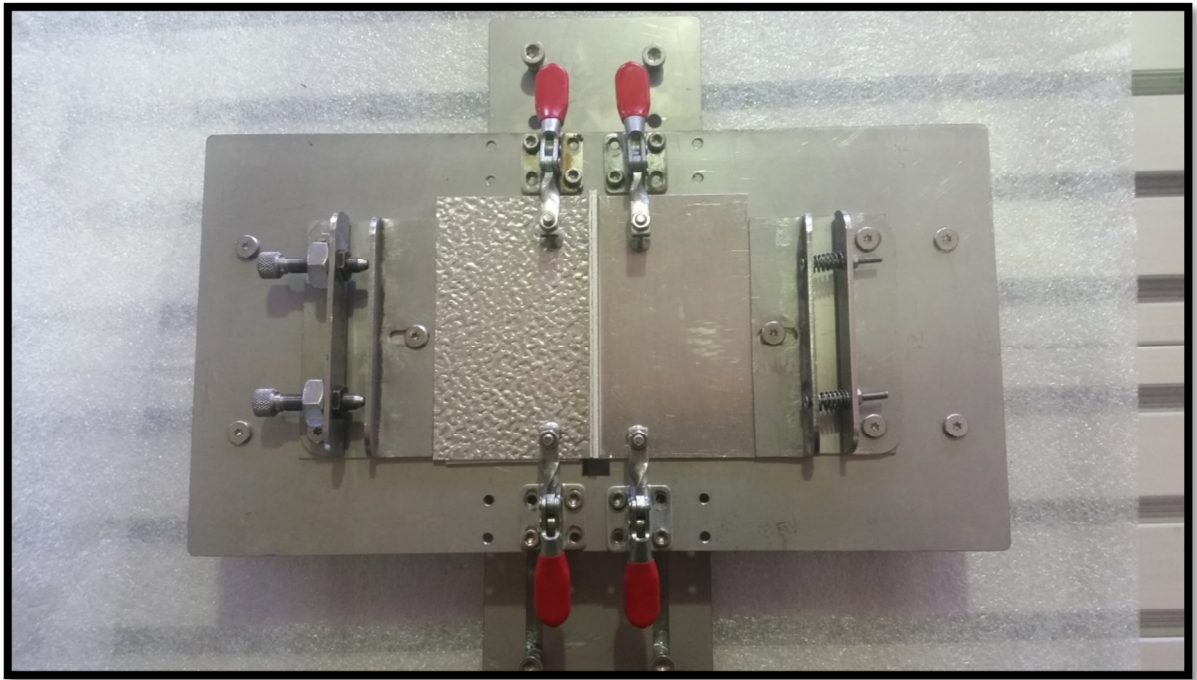


Abbildung 8: großer Spanntisch

3.2 Strahlcharakteristika

3.2.1 Leistungsmessung

Die vom Hersteller angegebene Laserleistung bezieht sich auf die Leistung direkt am Ausgang des Lasers. Durch die Komponenten zur Strahlführung und –formung bzw. alle Komponenten, welche am Strahlengang beteiligt sind, wird Laserstrahlung absorbiert und die Strahlqualität verändert. Deshalb muss eine Leistungsbestimmung durchgeführt werden um festzustellen, wieviel der eingestellten Leistung tatsächlich auf dem Probenmaterial ankommt. Bei der Leistungsmessung werden verschiedene Leistungsstufen eingestellt und in einem Diagramm mit der in Wirklichkeit applizierten Leistung verglichen. So kann man den prozentualen Leistungsverlust durch den Versuchsaufbau ermitteln und diesen durch das Einstellen entsprechend größerer Leistungen ausgleichen.

Aus zeitlichen Gründen konnte keine Leistungsmessung vorgenommen werden. Die in dieser Arbeit beschriebenen Leistungswerte beschränken sich also auf die, in der Software eingegebenen Leistungen.

3.2.2 Strahlvermessung

Vor Beginn der Schweißversuche muss zunächst eine Strahlvermessung durchgeführt werden. Dies ist erforderlich um die Strahlkaustik bzw. die räumlichen Strahleigenschaften des Laserstrahles zu quantifizieren.

Anhand der Strahlvermessung wird der Fokusedurchmesser, also der Strahldurchmesser an der Position der stärksten Fokussierung ermittelt. Diese Position wird auch als Strahl-taille bezeichnet. Auf Grund der gaußförmigen Intensitätsverteilung des Laserstrahls wird das Durchmesser-Symbol mit dem Index „0,86“ erweitert. Dies weist darauf hin, dass 86 % der applizierten Intensität innerhalb des Strahlfleckquerschnitts eingebracht wird [6].

Anhand der Rayleighlänge wird angegeben, mit welchem Abstand zur Fokusebene, entlang der optischen Achse des Laserstrahls, sich die Querschnittsfläche des Laserspots verdoppelt.

Auf Grund der hohen Strahlqualität und der daraus resultierenden großen Strahlwege mit den trotzdem sehr kleinen Strahldurchmessern konnte mit den am LHM vorhandenen Messgeräten keine Messung der Strahlqualität vorgenommen werden.

3.2.3 Strahlengang

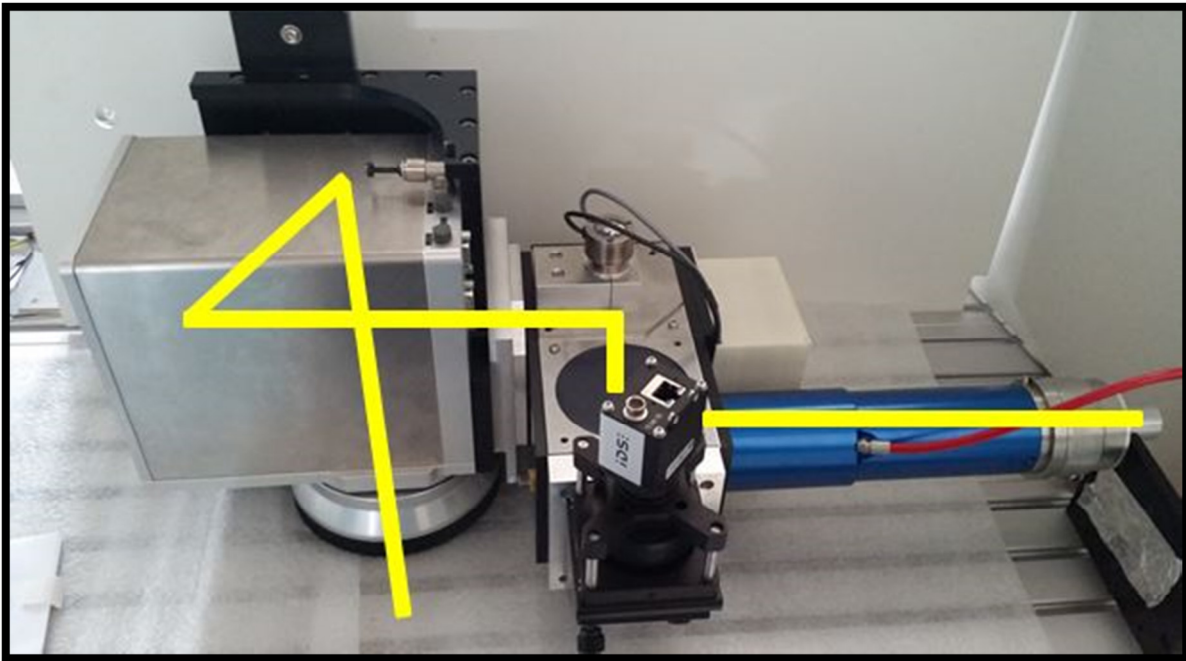


Abbildung 9: Strahlengang

In dieser Abbildung 9 soll der Strahlengang besser veranschaulicht werden. Der Aufbau ist dabei noch nicht an der Anlage montiert und hat einen anderen Kollimator. Der Laserstrahl gelangt über das optische Faserkabel vom Laser in den Kollimator, wo er geformt und gebündelt wird. Von dort trifft der Laserstrahl auf einen Umlenkspiegel, welcher den Strahl um 90° horizontal zum 1. Galvanometer ablenkt. Dessen Spiegel lenkt den Strahl vertikal optional mit einer Pendelbewegung ab, sodass der Strahl in den 2. Galvanometerscanner geleitet wird. Zwischen den Bauelementen waren 2 Adapterplatten nötig um diese zu verbinden. In diesem Scanner wird der Strahl durch einen Spiegel nach oben auf einen zweiten Spiegel gelenkt, der den Vorschub des Laserstrahls realisiert und den

Strahl senkrecht zur Optik führt. In der Optik wird der Strahl fokussiert und somit zum Werkzeug für die Materialbearbeitung.

3.3 Charakterisierung der Schweißproben

Für die experimentellen Untersuchungen wurden 3 verschiedene Materialien verwendet. Im Folgenden sollen die Materialien hinsichtlich ihrer Bezeichnung, Verwendung, chemischen Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften charakterisiert werden. Anschließend wird die Geometrie der verwendeten Proben erläutert und veranschaulicht.

3.3.1 Probenmaterial

3.3.1.1 X5CrNi18-10

Der X5CrNi18-10 (1.4301) ist ein austenitischer, nichtrostender und säurebeständiger Edelstahl und wird auch als V2A bezeichnet. Er wurde für die Beschriftungsversuche zur Ermittlung der Schweißspurbreite verwendet. Aufgrund seines niedrigen Kohlenstoffgehaltes, ist er auch ohne nachträgliche Wärmebehandlung nach dem Schweißen (bei Blechstärken bis 5mm) interkristallin beständig. Der Chrom-Nickel-Stahl ist temperaturbeständig bis zu Temperaturen von 600°C. Er ist mit elektrischen Verfahren gut schweißbar, er besitzt eine gute Polierfähigkeit und gute Verformbarkeit (Tiefziehen, Abkanten, Rollformen usw.). Für die spanende Bearbeitung müssen bei V2A, wegen der Neigung zur Kaltverfestigung, Werkzeuge aus hochlegiertem Schnelldrehstahl oder Hartmetall verwendet werden. Weitere Eigenschaften können der beigefügten Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Eigenschaften X5CrNi18-10

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Zugfestigkeit	Rm	540 - 740	N/mm ²
Dehngrenze	Rp0,2	230	N/mm ²
Bruchdehnung	A	45	%
Dichte	ρ	7,7	g/cm ³
Härte		215	HRC

Aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit und Säurebeständigkeit wird V2A sehr vielfältig eingesetzt. Beispiele hierfür sind die Nahrungsmittelindustrie, Getränkeproduktion, Phar-

ma- und Kosmetikindustrie, chemische Apparatebau, Architektur, Fahrzeugbau, Haushaltsgegenstände und -geräte, chirurgische Instrumente, Sanitäranlagen, Schmuckwaren, Kunstgegenstände, und so weiter [17].

Die chemische Zusammensetzung ist in der Tabelle 3 zusammengefasst. Hierbei liegen die Herstellerangaben von der Firma ThyssenKrupp [18] vor welche durch eine Funkenemissionsspektroskopie von Schwind [5] bestätigt wurden. Die Abbildung 10 zeigt das Grundgefüge des Werkstoffes. Es liegt ein voll-austenitisches Gefüge vor mit einigen Martensitnadeln, welche als Folge der Verformung beim Walzen des Blechs entstanden sind.

Tabelle 3: chemische Zusammensetzung X5CrNi18-10

Element	Herstellerangaben in [%]
C	$\leq 0,07$
Si	$\leq 1,00$
Mn	$\leq 2,00$
P	$\leq 0,045$
S	$\leq 0,015$
Cr	$\leq 17,0 - 19,5$
Ni	$\leq 8,0 - 10,5$
N	$\leq 0,11$
Mo	-
Nb	-
Ti	-

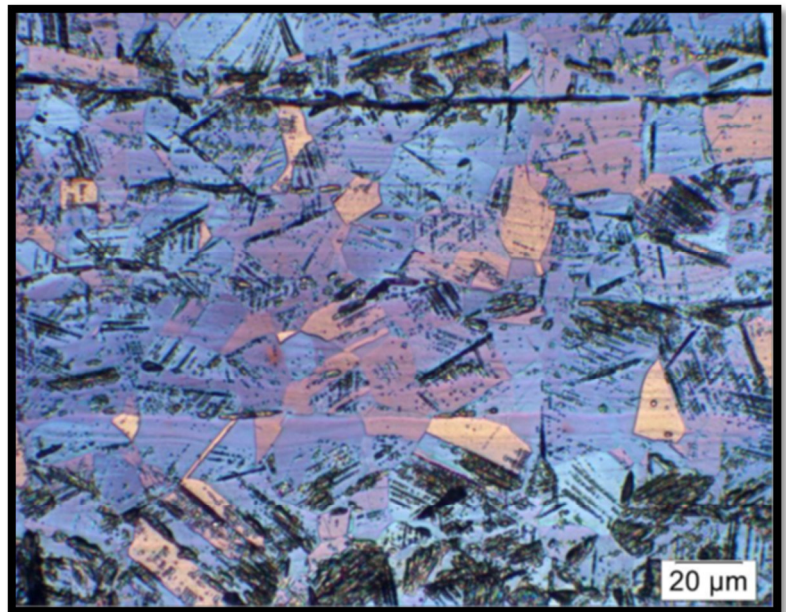


Abbildung 10: Gefüge X5CrNi18-10

3.3.1.2 AlMg3

Die Aluminiumlegierung En AW-5754 (AlMg3) mit der Werkstoffnummer 3.3535 ist eine nicht aushärtbare Knetlegierung. Der Anlieferungszustand W19 steht für einen weichge-

glühten und anschließend durch weitere Arbeitsgänge (z.B. Walzen, Biegen) geringfügig kaltverfestigten Werkstoff. Die Kaltverfestigung führt zu einer Festigungssteigerung, aber auch zur Abnahme der Zähigkeit und des Restumformvermögens. Aluminiumwerkstoffe sind durch mittlere Festigkeit und hohe Korrosionsbeständigkeit bei geringerer Dichte als Stahl gekennzeichnet. Die geringe Dichte ermöglicht eine gute Verformbarkeit von Alu-Werkstoffen. Ebenfalls kennzeichnend ist die höhere Wärmeleitfähigkeit und -ausdehnung. Die sehr gute Schweißbarkeit wird durch Poren, welche durch ins Schmelzbad gedungenen Wasserstoff verursacht werden, und Heißrissen eingeschränkt. Weitere Eigenschaften können der Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Eigenschaften AlMg3

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Zugfestigkeit	Rm	190-240	N/mm ²
Dehngrenze	Rp0,2	> 80	N/mm ²
Bruchdehnung	A5/A50	-/14-18	%
Dichte	ρ	2,67	g/cm ³
Härte		50	HB

Ohne hohe Ansprüche hinsichtlich Festigkeit und Zerspanung eignet sich AlMg3 für Schiff-, Fahrzeug-, Maschinen- und Vorrichtungsbau. Typische Anwendungen sind EPS-Formen und Vakuum-Tiefziehformen.

Die chemische Zusammensetzung zeigt Tabelle 5 [19]. Magnesium und Mangan in der Legierung verbessern die Heißrissicherheit. Außerdem besitzen diese Stoffe eine rekristallisationshemmende Wirkung. Ab einem Mg-Gehalt von 2,7% kann für naturharte AlMg-Legierungen von einem rissfreien Schweißen ausgegangen werden. Der Kupfergehalt wirkt sich hingegen negativ auf die Schweißbarkeit aus. Deshalb sollte der Cu-Gehalt unter 0,2% liegen.

Tabelle 5: chemische Zusammensetzung AlMg3

Element	Herstellerangaben in [%]
Si	0,40
Fe	0,40
Cu	0,10
Mn	0,50
Mg	2,6-3,4
Cr	0,30
Ni	-
Zn	0,20
Bem.	0,10-0,60 Mn+Cr
Ti	0,15
Rest	Al

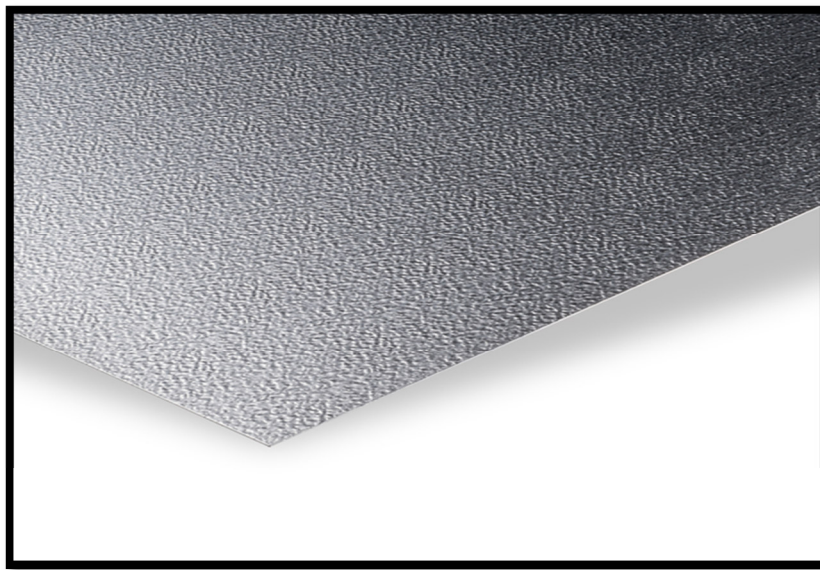
3.3.1.3 Al99,5

Das mit EN AW 1050A bezeichnete Reinaluminium hat den Anlieferungszustand F/G11 und ist somit kaltverfestigt und rückgeglüht (1/2 hart). Es ist wie das AlMg3 eine nichtaushärtbare Knetlegierung. Al99,5 besitzt ein hohes Umformvermögen, eine niedrige Festigkeit und ist wie AlMg3 schlecht spanbar. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit sind ebenfalls sehr gut, weshalb Al99,5 auch als elektrischer Leiter eingesetzt wird. Die Schweißeignung ist sehr gut, da es kein kritisches Temperaturintervall gibt, bei dem Heißrisse entstehen können. Weitere Eigenschaften zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Eigenschaften Al99,5

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Zugfestigkeit	Rm	65...95	N/mm ²
Dehngrenze	Rp0,2	> 20	N/mm ²
Bruchdehnung	A5/A50	22	%
Dichte	ρ	2,7	g/cm ³
Härte		22-35	HB

Die Oberfläche kennzeichnet sich durch das Stucco Design, welches in der Abbildung 11 einzusehen ist. Dieses Design ist erhöht witterungsbeständig und unempfindlich gegenüber leichten Beschädigungen. Die Oberfläche ist nicht spiegelnd und wirkt zerstreud. Dadurch sind mögliche Anwendungsgebiete Innenwände von Laseranlagen oder Stalldecken, welche bestimmte Brandschutzanforderungen einhalten müssen. Durch die Witterungsbeständigkeit ist ein Einsatz auch im Außenbereich möglich, sowie durch optische Eigenschaften für dekorative Anwendungen. Modell- und Leichtbau sind auch häufige Verwendungsgebiete.

**Abbildung 11: Stucco Design [20]**

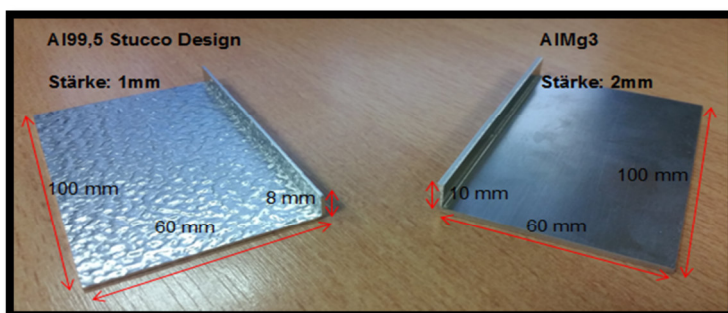
In der folgenden Tabelle 7 ist die chemische Zusammensetzung des Reinaluminiums zu sehen [21].

Tabelle 7: chemische Zusammensetzung Al99,5

Element	Herstellerangaben in [%]
Si	0,25
Fe	0,40
Cu	0,05
Mn	0,05
Mg	0,05
Cr	-
Ni	-
Zn	0,07
Ti	0,05
Ga	-
V	-
Al	Min. 99,5

3.3.2 Probengeometrie und Probenhandling

Für die experimentellen Untersuchungen wurden 3 Materialien mit verschiedenen Blechstärken und verschiedenen Stoßarten verwendet. Als Vereinfachung werden die Proben für die I-Nähte am Kurzflansch als auch am Kanteneinzug als L-Bleche bezeichnet. Ihre Geometrie ist in Abbildung 12 eingetragen.

**Abbildung 12: Geometrie L-Bleche**

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die Versuche mit dem entsprechenden Werkstoff, der Blechstärke und der Probengeometrie aufgelistet. Als weitere Vereinfachung wird für die Probengeometrie der I-Nähte am KF und KE auf Abbildung 12 verwiesen.

Tabelle 8: Probengeometrie und Probenhandling

Schweißprozess	Probenmaterial	Blechstärke	Probengeometrie
Beschriftung	X5CrNi18-10	1,5mm	100 mm x 100 mm
Kehlnaht für Querschliff	AlMg3	2mm	50 x 50 mm
	Al99,5 Stucco	1mm	
I-Naht am Kurzflansch für Querschliff	AlMg3	2mm	Siehe Abbildung 12
	Al99,5 Stucco	1mm	Siehe Abbildung 12
I-Naht am Kanteneinzug für Querschliff	AlMg3	2mm	Siehe Abbildung 12
	Al99,5 Stucco	1mm	Siehe Abbildung 12
Kehlnaht für Zugversuch	AlMg3	2mm	50 x 50 mm
	Al99,5 Stucco	1mm	
I-Naht am Kurzflansch für Zugversuch	AlMg3	2mm	Siehe Abbildung 12
	Al99,5 Stucco	1mm	Siehe Abbildung 12
I-Naht am Kanteneinzug für Zugversuch	AlMg3	2mm	Siehe Abbildung 12
	Al99,5 Stucco	1mm	Siehe Abbildung 12

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Untersuchungen zur überlagerten Bahnbewegung

4.1.1 Spaltüberbrückbarkeit

Durch die immer präziseren Laser, welche immer geringere Fokusburchmesser erreichen, wird die lokale Wirkungszone, auf die der Laserstrahl trifft immer geringer. Dies hat immer eine intensive Nahtvorbereitung, vor allem eine genaue Positionierung und Kantenvorbereitung der Proben, vorausgesetzt. Da für die experimentellen Versuche nur lasergeschnittene Körperkanten ohne Nachbehandlung verwendet werden sollten, befinden sich die vorherrschenden Spaltbreiten im Bereich von 60 bis 80 μm . Diese Spalten können nun mit Hilfe eines hochfokussierten Laserstrahles überwunden werden, indem Sinus-, Rechteck- oder Zick-Zack-Konturen mit Hilfe eines Scanners über den Fügespalt gependelt werden. Als Zielstellung sollte hierfür eine Schweißnaht erzeugt werden, welche eine Spaltüberbrückbarkeit von 100 bis 150 μm ermöglicht. Diese Eigenschaft ist für die industrielle Produktion ein klarer Vorteil, da zusätzliche Arbeitsvorgänge vermieden werden können und somit Kosten gespart werden.

Dieser Effekt ist besonders nützlich, da ein technischer Nullspalt in der Fügezone nur den Idealfall darstellt. In der Praxis treten bereits Toleranzen bei der Positionierung, der Bauteile selbst oder auch Verzug durch die thermische Belastung beim Fügeprozess auf. Einen größeren Spot kann man auch durch die Defokussierung des Laserstrahles erreichen. Allerdings steht dies im Interessenkonflikt mit den Vorteilen der hochbrillanten Faserlaser. Die Fähigkeit mit Hilfe einer oszillierenden oder gependelten Strahlführung bietet eine gute Alternative, die dennoch hochbrillanten Laser zur Erzeugung einer größeren Wirkungszone und somit zur Überbrückung größerer Spalte zu nutzen.

4.1.2 Konturform

Durch die Erzeugung einer überlagerten Bewegung soll eine gleichmäßige Energieeinkbringung über die so erzeugte breitere Kontur erfolgen und somit eine gleichmäßig tiefe Naht erzeugt werden. Bei den Versuchen erfolgt das Schweißen, mittels einer Zick-Zackförmigen und einer Sinusförmigen Nahterzeugung (siehe Abbildung 13). Der im Strahlengang 1. Galvanometerscanner erzeugt hierbei die Pendelbewegung, welche am Frequenzgenerator eingestellt wird. Der 2. Scanner realisiert die Vorschubbewegung auf dem Werkstück. Da die Bewegung auf 2 Komponenten aufgeteilt und der Galvanometerscan-

ner für die Pendelbewegung direkt angesteuert wird, werden höhere Schweißgeschwindigkeiten erwartet.

Eine vollständige Pendelbewegung besteht aus der Strahlauslenkung, sowie der Umkehrbewegung in die Ausgangslage. In Abbildung 14 ist eine „aufgependelte“ Sinus- Naht zu erkennen.

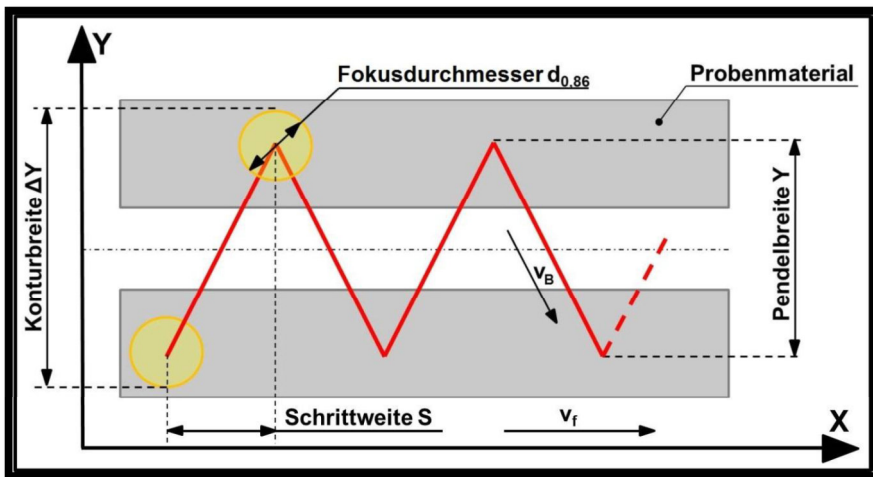
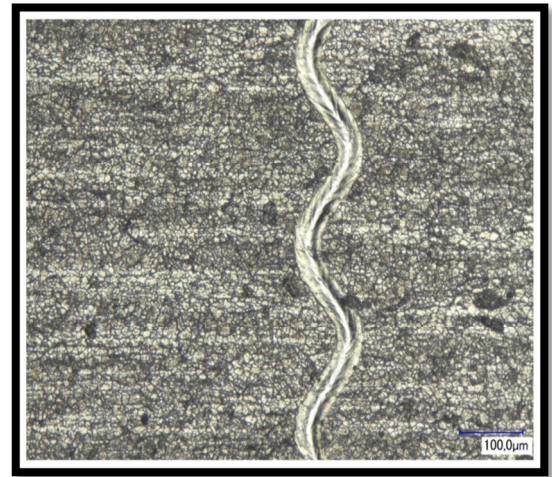


Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Pendelkontur [Wagner]



500W, 100m/min, 8kHz, 120mV

Abbildung 14: Sinus Kontur bei Beschriftungsversuch

4.1.3 Ermittlung des Frequenz-Spannungs-Äquivalents des Galvoscaners

Ziel der Voruntersuchungen war es die Grenzen der Massenträgheit des Systems zu ermitteln, bei denen die maximal mögliche Pendelfrequenz des Galvanometerscanners erreicht wird. Aus vorherigen Untersuchungen am LHM geht hervor, dass mit steigender Frequenz, die Periodendauer T abnimmt und somit eine überlagerte Schweißnaht entsteht. Dies ermöglicht eine bessere Spaltüberbrückbarkeit und eine bessere Nahtgüte aufgrund der Wärmeeinflusszone. Durch die Überlagerung der Pendelbewegung entsteht eine dichtere, breite Naht, welche eine deutlich bessere WEZ aufweist, da durch die Bewegung eine langsamere Abkühlung des Werkstoffes möglich ist.

Mit Hilfe von Blindschweißungen auf X5CrNi18-10 Blechen mit einer Stärke von 1,5 mm wurden die Frequenz-Spannungs-Äquivalente zur Ermittlung der Auslenkung experimentell bestimmt. Es wurden mehrere Nähte auf ein Blech aufgetragen um Material zu sparen (Siehe Abbildung 15). Weil für die Versuche nur lasergeschnittene Körperkanten ohne Nachbehandlung verwendet wurden und sollten, befinden sich die Spaltbreiten im Bereich von 60 bis 80 μm . Deshalb sollte mindestens eine Schweißnahtbreite von 100 bis 150 μm erreicht werden.

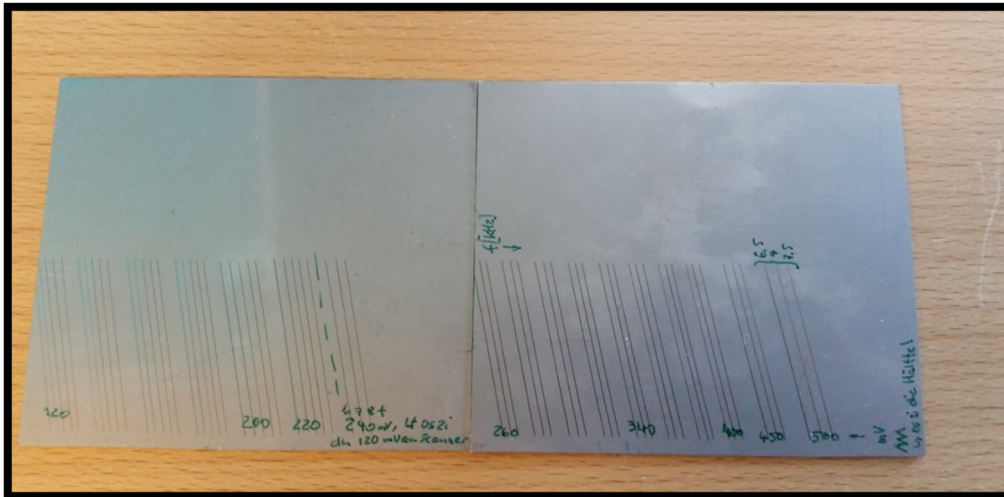


Abbildung 15: Beschriftungsversuche

Versuchsaufbau und –durchführung:

Der Versuchsaufbau unterscheidet sich nicht von dem der späteren Schweißversuche. Die Pendelbewegung und die Vorschubbewegung werden mit Hilfe der beiden Scanner realisiert. Das Werkstück bleibt auf seiner Position. Der Laserstrahl trifft senkrecht auf die Oberfläche des Werkstücks um ein Verzerren der Pendelkontur zu vermeiden. Als Laserquelle wird ebenfalls der YLS-10000-SM (Ytterbium Singlemode Faserlaser) der Firma IPG verwendet. Für die Untersuchungen wird eine Laserleistung von 500 W im CW-Betrieb verwendet. Durch die niedrig eingestellte Leistung konnte der Optikschatz vernachlässigt werden.

Bei der Versuchsdurchführung wurden verschiedene Frequenzen zu festgelegten Spannungen generiert um das Verhalten des Galvanometerscanners zu überprüfen. Als Resultat wird das Prozessfenster für Spannung und Frequenz ausgewählt, bei dem eine festgelegte und reproduzierbare Strahlauslenkung von 100 bis 150 μm (inklusive Fokusedurchmesser) erzeugt wird. Die eingestellten Frequenzen wurden von 4 kHz bis 8 kHz gewählt, da die Auswertung von Morgenstern [8] ergeben hat, dass Frequenzen unter 4 kHz auf Grund ihrer großen Schrittweite S keine gute Spaltüberbrückung aufweisen. Durch das Erzielen von höheren Pendelfrequenzen wird eine bessere Nahtqualität erwartet. Ebenfalls wurde die Frequenz von 8 kHz bei einer Spannung von über 120 mV vernachlässigt, da bei dieser Frequenz die Grenze der Massenträgheit des Galvanometersystems erreicht wurde. Dieser Umstand hat sich durch eine starke Lärmbelastung bemerkbar gemacht.

Zick-Zack-Spannung

Die Auswertung der Blindnähte mit eingestellter Zick-Zack-Spannung erfolgte mit dem Digitalmikroskop Olympus BX60. In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass die linearsten

Verläufe erst bei größeren Frequenzen eintreten. Bei Frequenzen unter 6 kHz treten wie bei Morgenstern [8] Schwingungen auf, welche der Eigenresonanz des Galvanometer-scanners zugeschrieben werden können. Die Auslenkungen der 5 kHz Messwerte über 90 mV beschränken sich auf die kleinsten gemessenen Auslenkungen, da ein korrektes Ausmessen auf Grund der Schwingungen nicht möglich war. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden deshalb nur Frequenzen über 6 kHz untersucht. Abbildung 16 zeigt die Auswertung der Messergebnisse von den erreichten Schweißnahtbreiten bei einer Geschwindigkeit von 10 m/min.

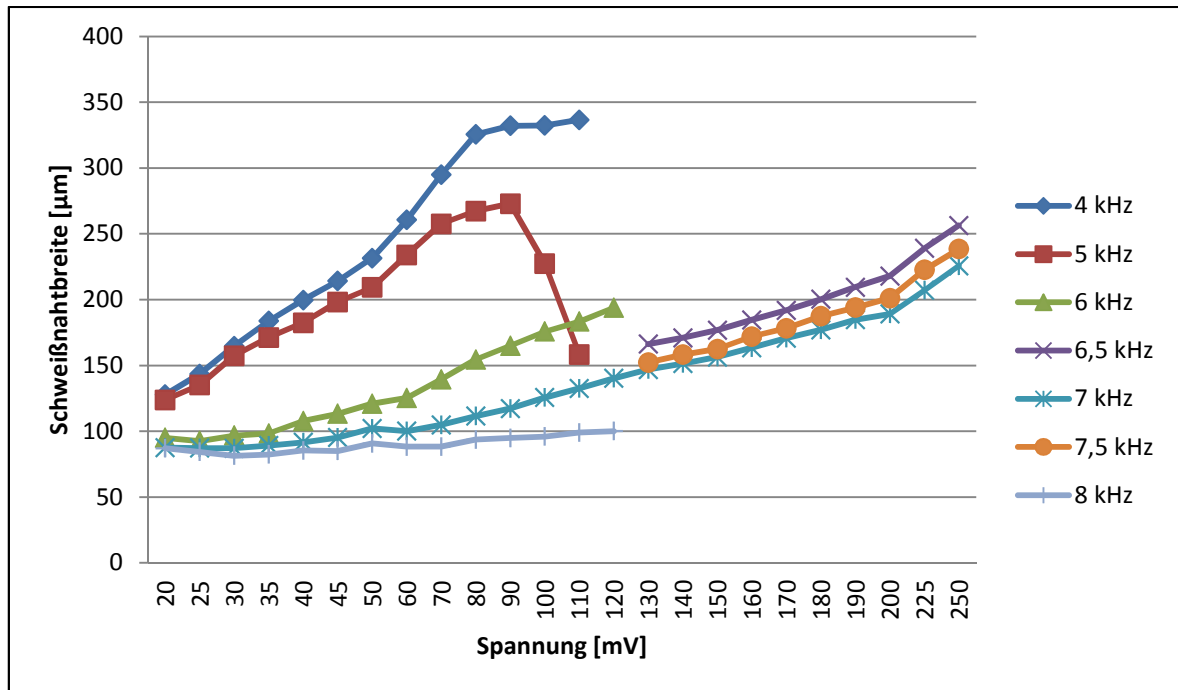


Abbildung 16: Frequenz-Spannungs-Äquivalent Zick-Zack bei 10 m/min

Die in Abbildung 16 weitergeführten Untersuchungen mit Frequenzen über 6 kHz zeigen allesamt einen fast linearen Anstieg der Auslenkung bis 190 mV. Danach steigen diese sprunghaft an. Alle Frequenzen über 6 kHz erzeugen bei höheren Spannungen Auslenkungen, welche größer als die gewünschten Strahlauslenkungen von 100-150 µm entsprechen. Die Werte liegen knapp über 150 µm. Da die Nähte aber dennoch dicht gependelt sind, setzen sie eine größere Spaltüberbrückung und Schweißnahtfestigkeit voraus.

Sinus-Spannung

Die Auswertung der Sinus-Spannungen erfolgte an einem Keyence Digitalmikroskop. Die aufgenommenen Schweißspurbreite-Spannungs-Graphen unterscheiden sich nur geringfügig mit denen der Zick-Zack-Spannung. Ab einer Spannung von über 190 mV neigt die Sinus-Spannung dazu „aufzupendeln“ und kann seine überlagerte Konturform nicht beibehalten. Dadurch kommt es zu geringeren Messwerten für die Schweißspur, da die Naht nichtmehr vollständig überlappend gependelt wurde. Die Grenze des Scanners ist somit erreicht. Zwischen diesen Spannungsformen gibt es also keine gravierenden Unterschiede.

de. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch mit der Vermutung von Barth [7], dass die Zick-Zack-Spannung aufgrund ihrer geringen Verweildauer im Maxima bzw. Minima als Signalspannung ungeeignet ist. Für die Spaltüberbrückbarkeit zeigt diese Spannung ein gutes Potential. Die Zick-Zack-Kontur zeigt in Tabelle 9 ein besseres Verhalten als die sinusförmige. Daher sollte diese Pendelung in zukünftigen Versuchen genauer untersucht werden.

Zusammenfassung:

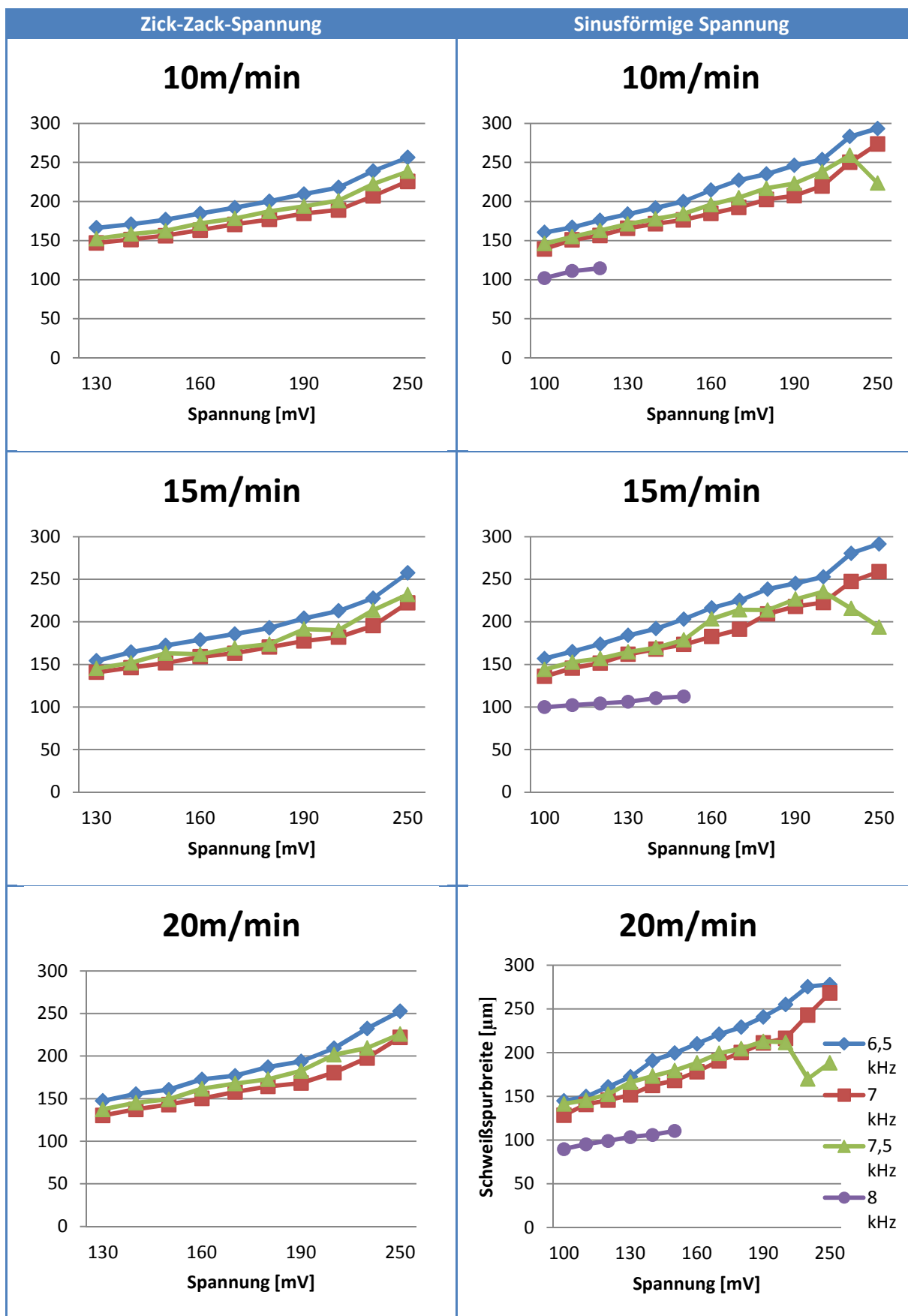
Diese Untersuchungen wurden mit 3 verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten realisiert, um einen Trend bei steigender Geschwindigkeit zu erkennen. In der Tabelle 9 wurden die durchgeführten Blindschweißversuche in Diagrammen aufgelistet. Dargestellt werden die ermittelten Schweißnahtbreiten für die eingestellte Frequenz und Spannung. Es wird unterschieden zwischen der sinusförmigen und Zick-Zack-Konturform.

Auffallend ist, dass sich beide Konturformen nicht groß unterscheiden. Sie besitzen bei gleichen Parametern fast identische Konturbreiten. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit sinkt die Auslenkung der Schweißspur bei beiden geringfügig (5 μm von 10 m/min auf 20 m/min). Das hat zur Folge, dass bei höheren Geschwindigkeiten schmalere Nähte entstehen. Die Zick-Zack-Spannung besitzt einen lineareren Verlauf und ist daher für weitere Untersuchungen sehr interessant. Bei den Sinus-Versuchen ist sehr auffällig, dass ab einer Spannung von 190 mV vermehrt große Schwankungen und Ausreißer auftreten.

Für die Schweißungen wurde sich dennoch für die Sinus-Kontur entschieden, da diese besser mit den Ergebnissen von vorangegangenen Arbeiten vergleichbar ist und im Übergangsbereich zwischen Maxima und Minima eine größere Verweildauer aufweist und somit eine bessere Energieeinkopplung über die Fügezone realisiert. Es wurde eine Frequenz von 7,5 kHz und eine eingestellte Spannung von 300 mV (real 150 mV) festgelegt. Da höhere Pendelfrequenzen schnellere Schweißgeschwindigkeiten ermöglichen und die Spannung für eine ausreichende Konturbreite genügt. In zukünftigen Versuchen sollten höhere Frequenzen als 8 kHz angestrebt werden um schneller schweißen zu können.

Das Versuchsprotokoll für die anschließenden Schweißversuche ist in Anlage A2 einzusehen.

Tabelle 9: Vergleich der Spannungsformen bei steigender Geschwindigkeit



4.1.4 Einfluss bei steigender Vorschubgeschwindigkeit und Leistung

Unter den Parametern von einer 8 kHz Frequenz und einer realen Spannung von 120 mV wurden Versuche zum Schweißen mit überlagerter Sinuskontur bei verschiedenen Leistungen (500 W und 1000 W in cw) und steigender Geschwindigkeit durchgeführt. Die Geschwindigkeiten reichen dabei von 10 m/min bis zur angestrebten Geschwindigkeit von 120 m/min. Abbildung 17 zeigt deutlich die Erkenntnis, welche aus diesen Versuchen gewonnen werden konnte. In erster Linie kann gesagt werden, dass mit steigender Vorschubgeschwindigkeit die Nahtbreite bis zur vollständigen Aufpendelung der Naht in eine Sinusform abnimmt. Eine größer eingestellte Leistung wirkt diesem Vorgang entgegen. Während sich bei 500 W die Sinuskontur bereits bei 30 m/min herausbildet, wird diese bei 1000 W erst bei über 80 m/min sichtbar. Höhere Leistung bedeutet auch mehr Wärmeeintrag in die Bleche. Dies ist deutlich an der WEZ und den Anlauffarben zu erkennen. Da speziell die Konturbreite für den Versuch wichtig war, wurde auf die Ränder der Schweißnaht fokussiert. Bei Geschwindigkeiten über 50 m/min traten bei 1000 W Leistung vermehrt Spritzer und Schmelzbadauswürfe auf. Spritzerbildung steigt massiv durch zunehmende Laserstrahlleistung und Vorschubgeschwindigkeit an. Abgesehen von der Verschmutzung der verwendeten Komponenten, sind Spritzer und Schmelzbadauswürfe auch für Nahteinfall, Endkrater und Löcher verantwortlich. Daher sollte die Spritzerbildung besonders untersucht werden.

Die Untersuchung bei steigender Geschwindigkeit ist in Anlage A3 tabellarisch dargestellt.

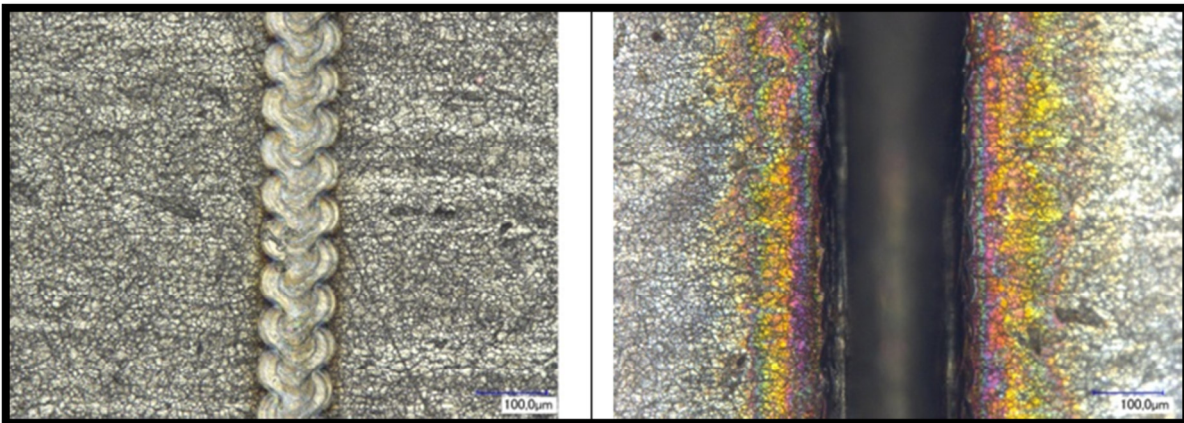


Abbildung 17: Nahtvergleich bei 30 m/min

5 Auswertung der Ergebnisse

5.1 Charakterisierung der Schweißproben

5.1.1 Sichtprüfung

Zur Untersuchung auf Schweißfehler und Unregelmäßigkeiten der in Versuchsprotokoll festgelegten Schweißversuche, wurde als erstes eine Sichtprüfung der erzeugten Nähte durchgeführt. Die Nähte wurden dabei vor Ort mit dem Auge und anschließend unter dem Keyence Digitalmikroskop mit geringer Vergrößerung begutachtet. Auffallend war, dass alle Nähte weder von Spritzern, Schlacke oder sonstiger Verschmutzung befreit werden mussten. Durch die Sichtkontrolle vor Ort konnten relativ gleichmäßige, schlanke und humpingfreie Nähte festgestellt werden. Nur bei einer Probe konnte ein Loch, auch als „Durchschussloch“ bezeichnet, und somit eine undichte Schweißnaht festgestellt werden. Die Probe mit ihren verwendeten Parametern ist in Abbildung 18 zu sehen. Die Dichtheit der Nähte ist vor allem in der späteren Anwendung im Laserschutzbereich von großer Bedeutung. Bei der anschließenden Zugprüfung der Proben wurde dieser Abschnitt der Probe nicht mit einbezogen.

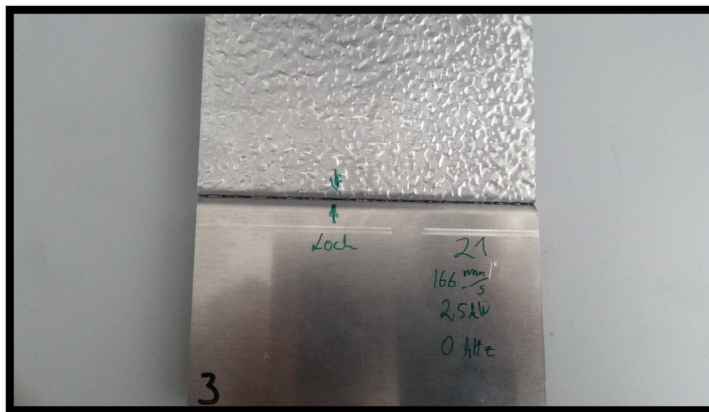


Abbildung 18: Nahtfehler undichte Schweißnaht

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Bördelnähte am Kanteneinzug bei genauerer Betrachtung mehr Nahtunregelmäßigkeiten aufweisen als die unter gleichen Parametern geschweißten Nähte am Kurzflansch. Logischerweise sind die am Digitalmikroskop untersuchten Nähte am Kanteneinzug schlechter einsehbar und somit schlechter zu beurteilen. Dennoch wird vermutet, dass diese Nähte unregelmäßiger sind, da ein größerer Spalt zwischen den Kanten der Bleche vorherrscht und der Laserstrahl somit schlechter positioniert werden konnte. Als Folge resultieren Nähte, welche erst in unterschiedlichen Tiefen beginnen. Die Abbildung 19 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Dennoch konnte dem Kan-

teneinzug als positiv zugesprochen werden, dass die Ausrichtung des Lasers in die Fügezone „ungenauer“ als am Kurzflansch erfolgen, da der Laserstrahl durch die abgerundeten Kanten in den Spalt reflektiert wurden.

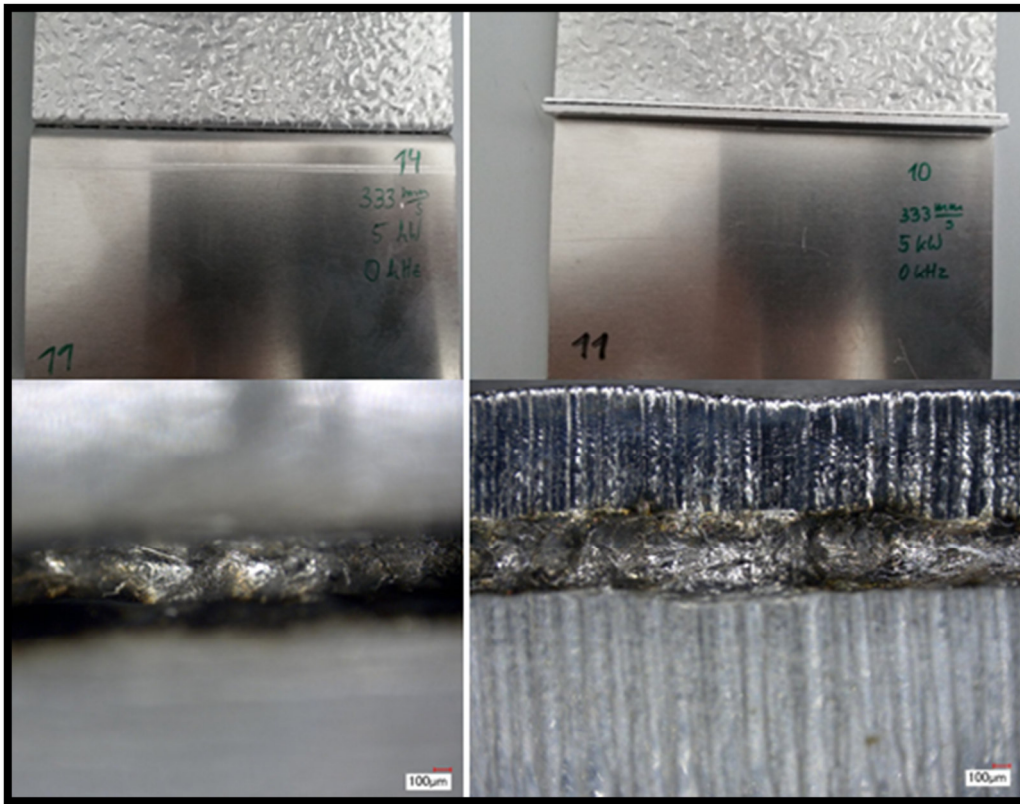


Abbildung 19: Nahtvergleich zwischen Kanteneinzug (links) und Kurzflansch (rechts)

5.1.2 Metallographische Untersuchungen

Zur mikroskopischen Auswertung der Nähte wurden Schliffproben erstellt. Dazu mussten die verschweißten Proben vorerst mit Hilfe einer Trennschleifmaschine in einbettbare Stücke geschnitten werden. Dabei ist darauf zu achten gleichmäßig und ohne viel Kraft die Proben zu trennen, um die Schweißnähte nicht zu verfälschen. In Abbildung 20 ist das Resultat dieses Schrittes anhand der Kehlnahtproben zu sehen. Wie auf dem Bild zu sehen, kam es dabei schon zur Lösung einiger Kehlnähte, was auf eine ungenügende oder kaum verbundene Schweißung schließen lässt.



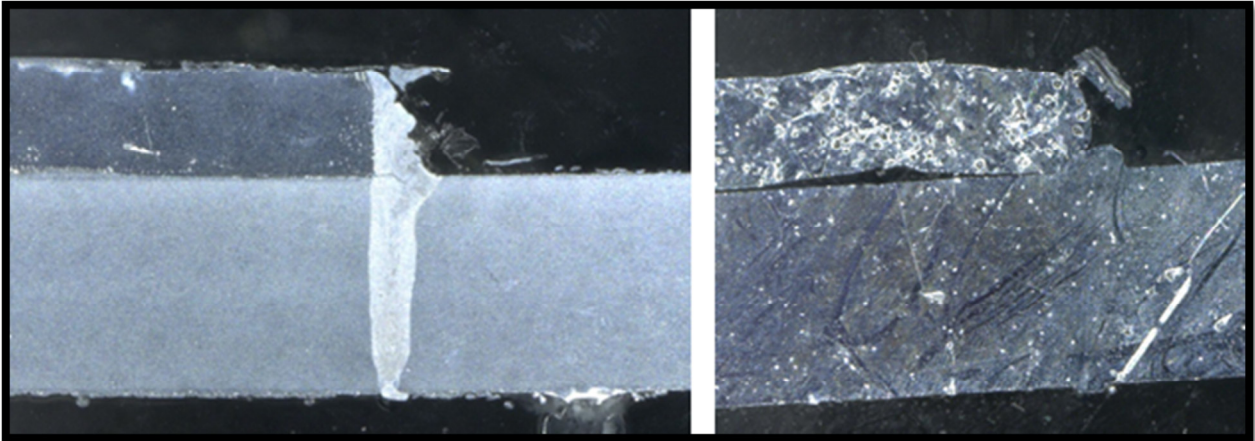
Abbildung 20: Vorbereitung Schliffproben der Kehlnähte

Anschließend wurden die Proben in Epoxidharz eingebettet und aushärten lassen. Die eingebetteten Proben wurden mit SiC-Papier nassgeschliffen bis sämtlicher Grat und Kratzer beseitigt wurden. Als letzte Arbeitsschritte wurden die Proben mit verschiedenen Diamantsuspensionen poliert und mit Hilfe eines Seidentuches feingepoliert. Um die Schweißnähte besser sichtbar zu machen wurden die Proben mit dem Ätzmittel nach Kroll geätzt. Dabei handelt es sich um ein Gemisch aus Wasser, Salpetersäure und Flußsäure, welches speziell für Aluminium und Aluminiumlegierungen Anwendung findet.

Um Aussagen über die Schweißnähte treffen zu können wurden von jedem Parametersatz 3 Proben (Anfang, Mitte, Ende) auf Fehler überprüft, die Schweißnahttiefe gemessen und daraus der Mittelwert gebildet. Gemessen wurden hierbei der Beginn und das Ende des Nahtquerschnittes. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Anlage A4 mit den Parametern angegeben und die Bilder der Schliffproben sind in Anlage A5 einzusehen. Bei der Auswertung der Schliffproben muss zwischen den folgenden Nahtarten unterschieden werden:

Kehlnähte:

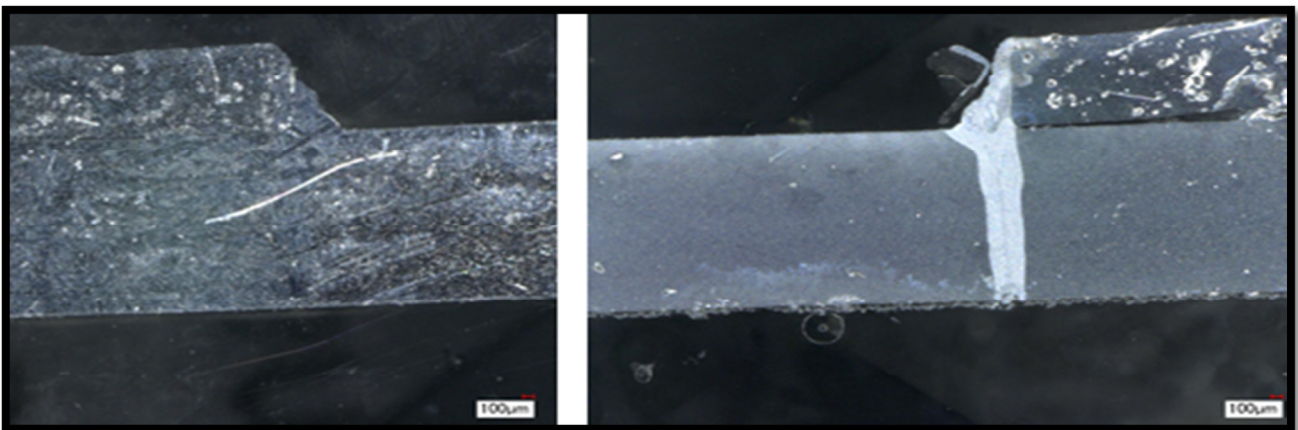
Das Hauptkriterium zur Untersuchung der Überlapp-Kehlnähte, war die Verschweißung an sich. Wie bereits beim Probentrennen festgestellt, wies ein Großteil der erzeugten Nähte eine ungenügende oder gar nicht verbundene Schweißnaht auf. Während der Versuche wurde festgestellt, dass eine erfolgreiche Schweißung erst mit einer Fokusverschiebung von 0,1 mm (im Protokoll mit a bezeichnet) auf dem oberen Blech, erreicht wird. In Abbildung 21 sind eine solche ungenügende Verschweißung und ein Riss zu sehen. Trotz der geringeren Heißrissanfälligkeit der verwendeten Werkstoffe, wird vermutet, dass es sich um einen Heißriss handelt, da diese typischerweise quer zur Schweißnaht durch die Schrumpfung der erstarrenden Schmelze entstehen. Bei beiden Proben ist ein leichtes Spiking an der Nahtunterseite zu verzeichnen.



Links: Riss, 2kW, 166mm/s, 7,5kHz, 150mV; Rechts: ungenügende Verschweißung 5kW, 500mm/s, 0kHz

Abbildung 21: Schweißnahtfehler

In Abbildung 22 sind vollständig verbundene Kehlnahtschweißungen am Überlapp zu sehen. Eine Liste der vollständigen Kehlnahtversuche ist in Anlage A4 aufgeführt. Auffallend ist, dass die erfolgreichen Nähte überwiegend ohne Pendelbewegung ausgeführt wurden. Der Hauptgrund hierfür ist, dass durch die Fokusverschiebung eine I-Naht am Überlapp realisiert wird und in diesem Fall ein linearer Nahtverlauf idealer ist. Es wurden auch Versuche mit einer Defokussierung unternommen. Diese konnten allerdings aus Verfügbarkeitsproblemen nicht mit Hilfe von Schliffproben untersucht werden. Zudem steht eine Defokussierung im Interessenkonflikt mit hochbrillanten Faserlasern, welche durch ihre Qualität große Leistungen auf einen kleinen Spot fokussieren können, um eine maximale Energieeinbringung in das Werkstück zu realisieren.



Links: 3kW, 333mm/s, 0kHz; Rechts: 4kW, 333mm/s, 0kHz

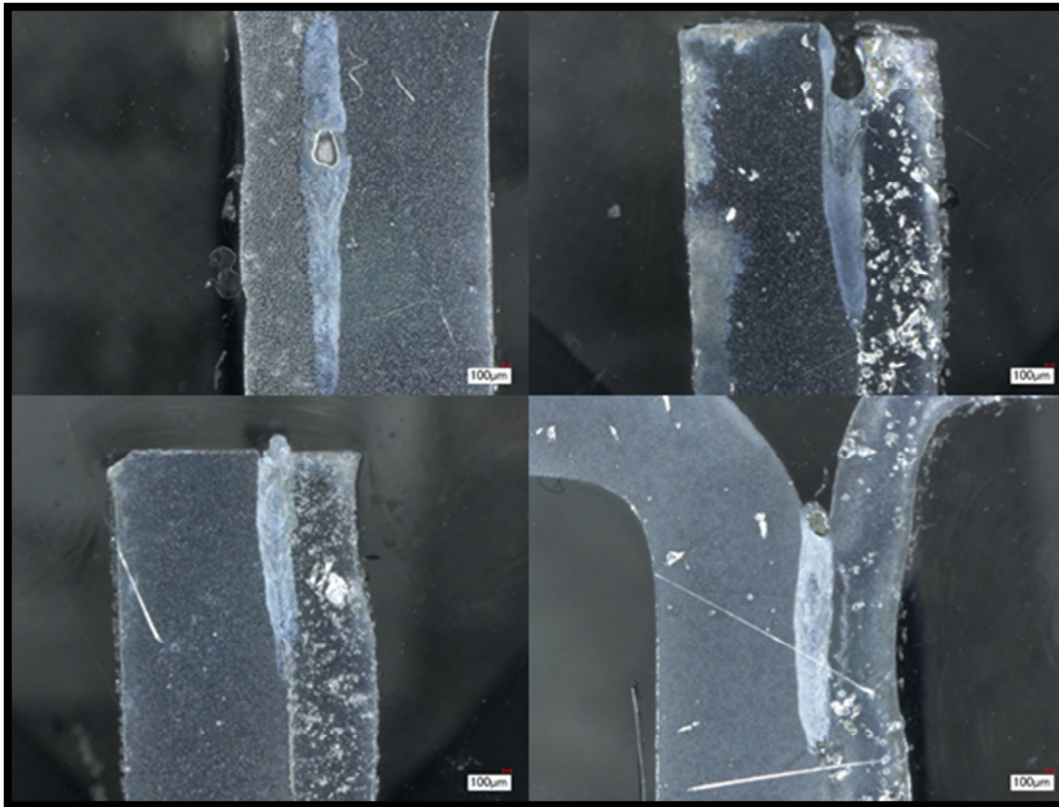
Abbildung 22: Verschweißte Kehlnähte

Bördelnähte:

Bei allen erzeugten Bördelnähten wurde wie erwartet auf Grund des tiefen Fügespaltes von mehreren Zentimetern keine Durchschweißung erreicht. Dennoch konnten zufriedenstellende Nähte von 4 bis 5 mm Tiefe erreicht werden. Gemessen wurden hierbei der Beginn und das Ende des Nahtquerschnittes. Anhand dieser Tatsache konnte der Nahtfehler Spiking nicht weiter untersucht bzw. ausgeschlossen werden. Die Nähte im Kanteneinzug zeigten bis auf eine Ausnahme eine geringere Schweißnahttiefe als die der Nähte am Kurzflansch. Dies ist auf die Neigung zu Nahteinfall, welche im folgenden Abschnitt erläutert wird, zurückzuführen. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass durch steigende Leistung tiefer geschweißt werden konnte und dem eine steigende Vorschubgeschwindigkeit entgegenwirkt. Im Umkehrschluss ist für schnellere Schweißungen eine größere Leistung erforderlich um tiefe Nähte zu erzeugen.

In der Abbildung 23 sind auftretende Nahtfehler mit ihren Parametern abgebildet. Die Nähte am Kanteneinzug und am Kurzflansch wiesen fast ausschließlich Nahteinfall auf. Ein Nahteinfall steht im engen Zusammenhang mit der Spaltüberbrückbarkeit und entsteht durch zu breite Fügespalte. Nahteinfälle reduzieren den tragenden Querschnitt einer Fügeverbindung, erzeugen Kerben und mindern somit die Festigkeit der Verbindung. Da durch die Spannvorrichtungen der Fügespalt so klein wie möglich gehalten wurde (siehe Schliffbilder), ist eine wahrscheinlichere Ursache der Auswurf von Spritzern, durch die Material aus Schweißnaht verloren geht. Eine Kontrolle dieser Vermutung könnte durch Abwiegen der Proben vor und nach dem Schweißen geprüft werden. Auffallend hierbei war, dass es keine Rolle spielte, ob die Naht gependelt wurde oder linear aufgetragen wurde. Eine erhöhte Neigung zum Nahteinfall zeigten die Nähte am Kanteneinzug, da die dortige Spaltbreite auf Grund der gebogenen Kanten des Bleches größer als die am KF ist. Zur Vermeidung dieses Effektes muss über die Erzeugung einer größeren Schweißnahtbreite bei der Pendelung nachgedacht werden oder über eine Stabilisierung des Schmelzbades, um einen Auswurf zu verhindern. Natürlich ist das verwendete Stucco Design Blech auf Grund seiner Beschaffenheit (ungleichmäßig geformt) nicht ideal um eine fehlerfreie Schweißnaht zu erzeugen.

Bei allen untersuchten Schliffproben wurden keine Bindefehler oder Risse der Werkstoffe und des Schweißgutes festgestellt. Die Nahtfehler wie Humping und Wurzelrückfall hingegen konnten nur sehr selten verzeichnet werden. Einige Schliffbilder zeigten Poren. Es wird vermutet, dass es sich dabei um Wasserstoffporen handelt. Durch die schnelle Erstarrung der Schmelze beim Laserstrahlschweißen kann im Schmelzbad gelöster Wasserstoff nicht mehr entweichen und erstarrt in Form von Wasserstoffbläschen. Besonders Aluminium ist davon betroffen, da Aluminium eine hohe Affinität zu Sauerstoff besitzt. Umgebender Wasserdampf reagiert mit Aluminium und setzt atomaren Wasserstoff frei. Um die Vermutung zu überprüfen wäre eine Untersuchung am REM möglich, um die stoffliche Zusammensetzung herauszufinden.



oben links: Pore am KE, 5kW, 333mm/s; oben rechts: Nahteinfall am KF, 2,5kW, 166mm/s
 unten links: Hump am KF, 3kW, 333mm/s, 7,5kHz, 150mV; unten rechts: Pore am KE, 3kW, 333mm/s, 7,5kHz, 150mV

Abbildung 23: aufgetretene Nahtfehler

5.2 Festigkeitsuntersuchungen

5.2.1 Härtemessung

Die Härte ist der Widerstand eines Werkstückes, welcher dem Eindringen eines anderen Körpers entgegengesetzt wird. Die Härtmessung ist ein grundlegendes Verfahren zur Untersuchung von Festigkeitseigenschaften und –änderungen an Werkstoffen. Dennoch wurde in dieser Arbeit auf Grund der verwendeten, nicht aushärtbaren Alu-Knetlegierungen auf eine Härtmessung verzichtet, da mit keiner gravierenden Änderung der Härtewerte zu rechnen ist. Wie es die Bezeichnung der Materialien schon sagt, kann keine Aushärtung durch Temperatureinfluss erfolgen. Nicht aushärtbare bzw. naturharte Aluminiumlegierungen können aber durch Verfestigung härter werden. Möglicherweise wäre eine Entfestigung der kaltgewalzten Bleche auf Ausgangshärte feststellbar. Jedoch ist beim Laserstrahlschweißen der Zeitraum der Wärmeeinbringung so kurz, dass es nicht für eine Rekristallisation des Gefüges reicht.

5.2.2 Zugprüfung

Nach [22] ist Der Zugversuch ein genormtes Standardverfahren der Werkstoffprüfung zur Bestimmung der Streckgrenze, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und weiterer Werkstoffkennwerte. Überdies kann hiermit die Belastbarkeit von Volumenkörpern und Verbindungen (bspw. Schweiß- oder Schraubverbindungen) auf Zug untersucht werden. Dieses Verfahren gehört zu den zerstörenden Prüfverfahren.

Die Zugversuche wurden nur an den Bördelnähten mit den zusammengeschweißten AlMg3 und Al99,5 L-Blechen durchgeführt. Dabei wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2mm/min bis zur Vorspannkraft von 5 N und anschließend mit 10mm/min bis zum Kraftabfall von 95 % (Bruch) gezogen. Bei der Prüfmaschine handelt es sich die Inspect Retrofit 100kN MFX der Firma Hegewalt & Peschke. Die Maschine und die Einspannung der Proben sind in der Abbildung 24 abgebildet. Auf eine Spannungs-Dehnungs-Messung musste verzichtet werden, da die Schweißnähte nicht und somit auch nicht der Querschnitt wie bei Stumpfstoßschweißungen in der Zugachse/Kraftachse liegen. Dadurch treten nun auch je nach Naht am KE oder Naht am KF unterschiedliche Momente auf. Zusätzlich kann bei den Proben durch das Stucco Design, der unterschiedlichen Einschweißtiefe und Nahtbreite von keinem konstanten Querschnitt der Naht ausgegangen werden.

Um dennoch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden die Kräfte und die Zurückgelegte Strecke beim Ziehen in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgenommen. Von jeweils 3 maximalen Kräften (F_m) je Parametersatz wurde der Mittelwert gebildet und in Anlage A4 mit den Ergebnissen der metallographischen Untersuchungen zusammengefasst.

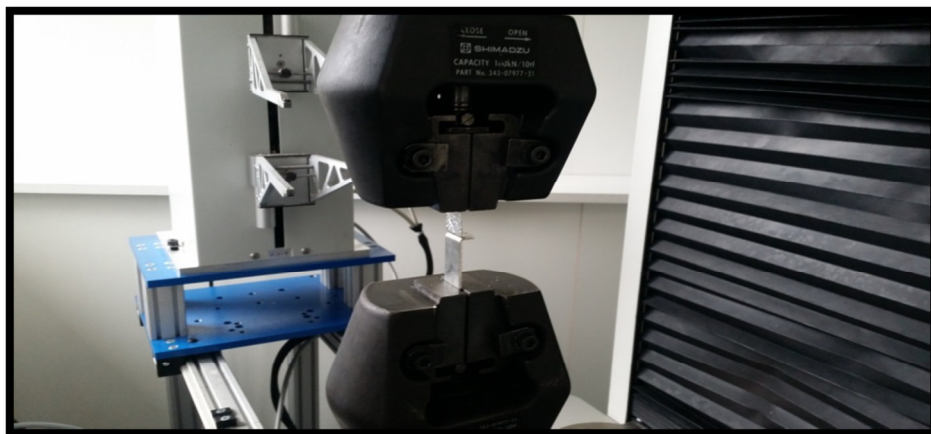


Abbildung 24: Einspannung in Zugprüfmaschine

Da keine genormten Zugprüflinge für die erzeugten Schweißungen existieren, wurden aus den Schweißproben jeweils drei 2 cm breite Blechstreifen (siehe Abbildung 25) ausgesägt.

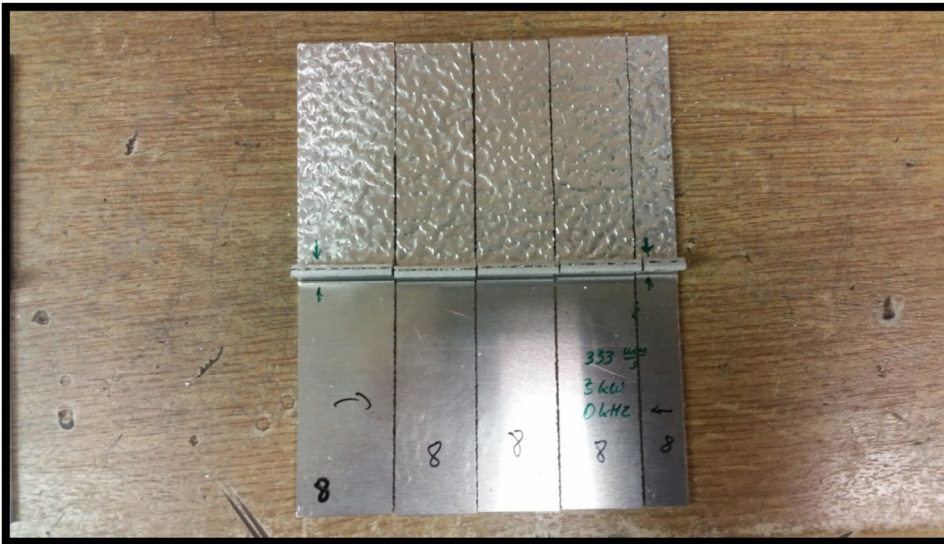
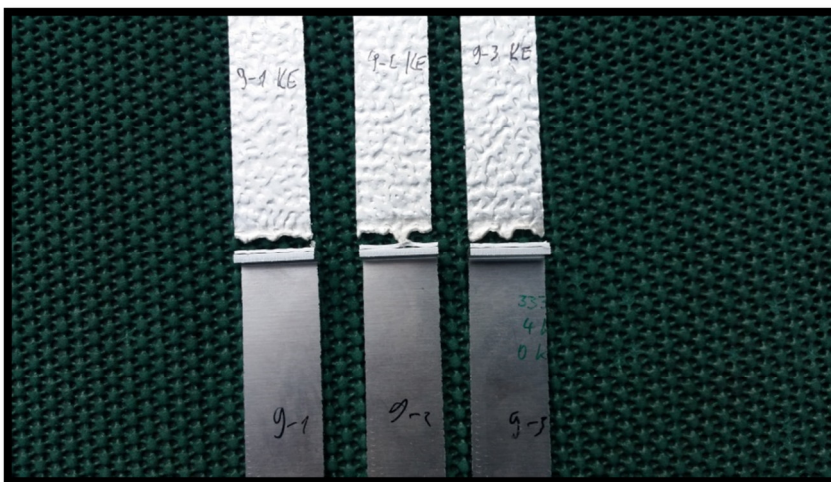


Abbildung 25: Aussehen der Zugproben

Die Begutachtung der Bruchflächen hat gezeigt, dass die Biegung der Bleche während des Zugversuches auseinander gezogen wurde. Außerdem sind die Bleche fast alle an der Naht gerissen. Dabei kam es in seltenen Fällen zu einer „Abschälung“ der Naht. Ein Problem was an beiden Bördelnähten zu verzeichnen ist, war dass die Bruchflächen zwar an der Naht rissen, aber dennoch weiter verformt sind. Um dies zu verdeutlichen kann man sich die Ausfranzungen einer Briefmarke vorstellen. Beim Kanteneinzug wird diese Problematik durch den unterschiedlich tiefen Nahtbeginn vermutet. Am Kurzflansch entsteht dieses Phänomen, da der Zugversuch zuerst an der Wurzel der Naht wirkt. Abbildung 26 zeigt diese Problematik, welche auf eine unregelmäßige Schweißnaht hindeutet.



4kW, 333mm/s

Abbildung 26: getrennte Zugprobe am KE

Die Ergebnisse der aufgenommenen Kräfte zeigen, dass alle Proben in etwa bei einer Zugkraft von 850 bis 1200 N getrennt wurden. Da alle Proben im Al99,5 Stucco Design Werkstoff nach Entformung des Biegeradius rissen, wurden von diesem Werkstoff 2 cm Streifen ebenfalls gezogen. Dabei kamen mit Kräften von über 2500 N deutlich höhere Werte raus. Auf Grund dieser Tatsache und der Beobachtung, dass nahezu alle Bleche an der Naht gerissen sind, kann man darauf schließen, dass die Nähte eine höhere Festigkeit als das Grundmaterial an dieser Stelle besitzen. Daraus folgt, dass anhand der Kräfte nicht weiter auf die Beurteilung der unter den Schweißversuchen verwendeten Parameter eingegangen werden kann. Prinzipiell werden die Bleche vorher kalt gewalzt und sind damit kaltverfestigt. Dies setzt eine höhere Festigkeit voraus, wie es bei der Zugprüfung des GM festgestellt wurde. Doch durch das Biegen zu den L-Blechen wird davon ausgegangen, dass ungünstige Spannungszustände und Kerben im Biegebereich erzeugt wurden. Dies setzt die Zugkraft deutlich herab und begründet die ermittelten Ergebnisse. Wie bereits erwähnt ist die Entfestigung durch die Effekte des Rekristallisationsglühens während des Laserschweißprozesses unwahrscheinlich.

Die Kräfte, welche am Kanteneinzug aufgebracht werden mussten, waren bei allen Messwerten größer als die am Kurzflansch. Dieser Effekt ist durch die unterschiedlichen Momente an den Nähten zu erklären. Der KE liegt viel näher an der Zugachse, wodurch das wirkende Moment kleiner ist. Der KF hingegen hat einen längeren Hebelarm bis zur Zugachse und wird von der Nahtwurzel beginnend gezogen. Deswegen sind kleinere Kräfte nötig. Entgegengesetzt ist es mit dem zurückgelegten Weg der Zugmaschine. Am KF sind die längsten Wege zu verzeichnen, da mehr Material zwischen der Zugachse liegt, welches sich verformen und verbiegen kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurden Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitslaserschweißen an alternativen Stoßarten mit 5 kW Monomode Faserlaser durchgeführt. Hierfür wurde speziell das Fügen von AlMg3 und Al99,5 (Stucco Design) mit Kehlnaht am Überlapp, sowie mit Bördelnähten (hier mit I-Naht am Kurzflansch und Kanteneinzug bezeichnet) untersucht. Die Schweißversuche sollten mit überlagerter/pendelnder Strahlführung und linearer Strahlführung durchgeführt werden.

Zu Beginn war es nötig die Komponenten zur Strahlführung, -formung und -ablenkung zu beschaffen und in einer Baugruppe zu vereinen. Ein weiterer Schritt war das Konstruieren von Spannvorrichtungen, die für die Fügestöße und Probengeometrien geeignet waren.

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden vor allem allgemeine Rahmenbedingungen zur Gewährleistung von reproduzierbaren und vergleichbaren Ergebnissen geschaffen. Dazu gehörte eine Beschreibung der verwendeten Ausrüstung, eine Charakterisierung der Werkstoffproben und Informationen zu den Schweißprozessparametern.

Als erstes Experiment wurde das Erzeugen der Pendelbewegung genauer untersucht. Dabei kam es im Wesentlichen auf die Eigenschaft der Spaltüberbrückung und an. Der Vorteil von überlagerten Bahnbewegungen ist die Erzeugung breiterer Schweißnähte und somit die Überwindung größerer Fügespalte. Anhand von Konturbreitemessungen an Sinus- und Zick-Zack-Nähten konnten die Frequenz- und Spannungsbereiche ermittelt werden, welche eine nahezu einstellbare Konturbreite ermöglichen. Dabei ist das Ziel möglichst hohe Frequenzbereiche zu erzielen um höhere Schweißgeschwindigkeiten erreichen zu können. In einem Versuch mit steigender Vorschubgeschwindigkeit und unterschiedlichen Leistungen, hat sich ergeben, dass mit steigender Geschwindigkeit die Konturbreite abnimmt und mit größerer Leistung breitere Nähte erzeugt werden können. Eine höhere Leistung ermöglicht auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten eine breitere Naht. Allerdings steigt mit der Vorschubgeschwindigkeit und Leistung auch die Neigung zur Spritzerbildung. Die geforderte Schweißgeschwindigkeit konnte mit den ermittelten Parametern nicht erreicht werden, da viel höhere Frequenzen nötig sind um mit gependelter Strahlführung eine breite und tiefe Naht zu erreichen. In dieser Hinsicht sind die derzeitigen Galvanometer Spiegel durch ihre Massenträgheit stark eingeschränkt.

Anhand der ersten Versuche wurden Parameter für die folgenden Schweißversuche festgelegt. Von diesen Schweißversuchen wurden Schliiffproben angefertigt, welche zur Auswertung von Nahtfehlern, wie Risse, Poren, Nahtefall und Humping, aber auch zur Messung der Einschweißiefen verwendet wurden. Anhand der resultierenden Ergebnisse aus

den Schliffbildern, wurden die erfolgversprechendsten Parameter selektiert und erneute Schweißungen für die Festigkeitsuntersuchung angefertigt. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen sind im Kapitel 5 Auswertungen genauer erläutert.

Es konnten in den Versuchen erfolgreiche Kehlnähte geschweißt werden, aber es traten immer wieder Verbindungsprobleme der Schweißnaht auf. Daher konnte kein sicheres Prozessfenster für diese Nähte gefunden werden. Es wird vermutet, dass die exakte Positionierung auf den Probenblechen eine erhebliche Rolle für den Erfolg einer solchen Verschweißung ist und müsste daher näher untersucht werden. Für die bessere Spaltüberbrückbarkeit an Kehlnähten könnte über die Zufuhr von Zusatzwerkstoff in Drahtform nachgedacht werden.

Bei den Bördelnähten konnten bis zu 5 mm tiefe und vollständig verbindende Schweißnähte erzeugt werden, welche im Zugversuch eine höhere Festigkeit aufwiesen als das umgebende Grundmaterial. Dabei ist jedoch stark zwischen den Nähten am Kanteneinzug oder am Kurzflansch zu unterscheiden. An diesen Nähten konnte häufig Nahteneinfall beobachtet werden, welcher durch ein instabiles Schmelzbad zu begründen ist. Zur Minimierung solcher Erscheinungen könnte nach [23] ein nachlaufender defokussierter Laserstrahl eingesetzt werden. Dieser nachlaufende Strahl soll das beim Aluminiumschweißen sehr unruhige Schmelzbad stabilisieren und beugt durch das wiederholte Aufschmelzen der Entstehung von Nahtfehlern wie z.B. Einbrandkerben, Schmelzauswürfe und unregelmäßige Nahtoberraupen vor.

Eine Geschwindigkeitssteigerung könnte durch die Anordnung einer Cross-Düse erreicht werden. Aus den Arbeiten von Schwind [5] und Morgenstern [8] ist bekannt, dass eine entstehende Dampfplasmafackel einen Teil der Intensität vom absorbiert. Durch die Verdrängung der Fackel sind größere Einschweißstiefen und somit eine Steigerung des Vorstubes möglich.

Die Einbeziehung von akustooptischen Modulatoren (AOM) ermöglicht eine Strahlteilung bei gleichbleibender Strahlqualität. So könnten mehrere Spots aus einer Laserquelle gleichzeitig arbeiten. Drei Spots könnten auch eine breite Bearbeitungsspur erzeugen und das Schmelzbad noch nachwärmen. Ebenfalls bieten elektrooptische Modulatoren (EOM) eine weitere Möglichkeit diese Problematik. Diese sind in der Lage viel größere Frequenzen zu realisieren. Allerdings sind diese bis jetzt nur für geringe Leistungen ausgelegt.

Quellenverzeichnis

- [1] Jan Hauptmann, Andreas Fürst, Peter Rauscher, Patrick Herwig, Andreas Wetzig, Eckhard Beyer: HOCHLEISTUNGS-REMOTE-BEARBEITUNG - APPLIKATIONEN UND SYSTEMTECHNIK -, Lasertagung Mittweida, 2015
- [2] Florian Albert, Alexander Müller, Pravin Sievi: Laserstrahl-Remoteschweißen, Lasertechnik Journal, 2013
- [3] Fraunhofer ILT, Gezielte Beeinflussung der Nahtgeometrie beim Laserstrahlmikroschweißen, Jahresbericht, 2015
- [4] Fraunhofer ILT, Nahtformung durch örtliche Leistungsmodulation beim Mikroschweißen, Jahresbericht, 2014
- [5] Schwind, Sascha: Hochgeschwindigkeitslaserschweißen mit einem 3kW Monomode Faserlaser; Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau, Masterarbeit; 2013
- [6] Wagner, Matthias: Grundlagenuntersuchung zum Hochgeschwindigkeitslasertiefschweißen mit überlagerter Bahnbewegung, Hochschule Mittweida, Diplomarbeit, 2014
- [7] Barth, Johannes: Hochgeschwindigkeitslaserstrahlschweißen mit adirektionaler Strahlführung durch mechanisch pendelnde Strahlablenkung, Bachelorarbeit, 2015
- [8] Morgenstern, David: Weiterführende Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitslaserschweißen mit überlagerter Bahnbewegung, Diplomarbeit, 2016

- [9] Benutzerhandbuch, Ytterbium Laser System, YLS-10000-SM, SN – 15048851, 2015

- [10] Benutzerhandbuch, Installation und Inbetriebnahme, intelliSCANde,® 30 (Art.Nr. 124460), 2013

- [11] SILL Optics,
http://www.silloptics.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Datasheet/S4LFT1500-328.pdf, 10.09.2016

- [12] <http://www.batronix.com/versand/funktionsgeneratoren/Rigol-DG2021A.html> , 10.09.2016

- [13] <http://www.batronix.com/versand/oszilloskope/Rigol-DS1052E.html> , 10.09.2016

- [14] <https://de.ids-imaging.com/store/ui-5490se.html>, 10.09.2016

- [15] <http://www.conrad.ch/ce/de/product/512774/Labornetzgeraet-einstellbar-VOLTCRAFT-VSP-2403-01-40-VDC-0-3-A-249-W-Anzahl-Ausgaenge-3-x?ref=searchDetail>, 10.09.2016

- [16] Produktkatalog, Kapitel 2.28: Horizontalschnellspanner; DE-STA-CO Europe GmbH; 2013

- [17] <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/44-edelstahl>, 20.10.2016

- [18] ThyssenKrupp Materials International GmbH: Datenblatt:1.4301, X5CrNi18-10;Mühlheim a. d. Ruhr; 2007

- [19] http://www.cnc.at/media/pdf/material/Datenblatt_AIMg3_EN_AW-5754.pdf

20.09.2016

- [20] [https://shop.kloeckner.de/Aluminium-Blech-EN-AW-1050-\(Al99,5\)-H14-H24-stucco-dessiniert/p/1000128](https://shop.kloeckner.de/Aluminium-Blech-EN-AW-1050-(Al99,5)-H14-H24-stucco-dessiniert/p/1000128) 22.09.2016
- [21] DIN EN 573-3:2009-08
- [22] <https://de.wikipedia.org/wiki/Zugversuch> ,02.11.2016
- [23] W. Gref: Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrix-technik, 2005

Anlagen

- A1 Spannbacke
- A2 Versuchsprotokoll Schweißversuche
- A3 Nahtvergleich bei steigender Geschwindigkeit und unterschiedlicher Leistung
- A4 Ergebnisse aus Zugversuch und Querschleifen
- A5 Parameter, Querschleife, Zugkurven und Bruchkanten

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

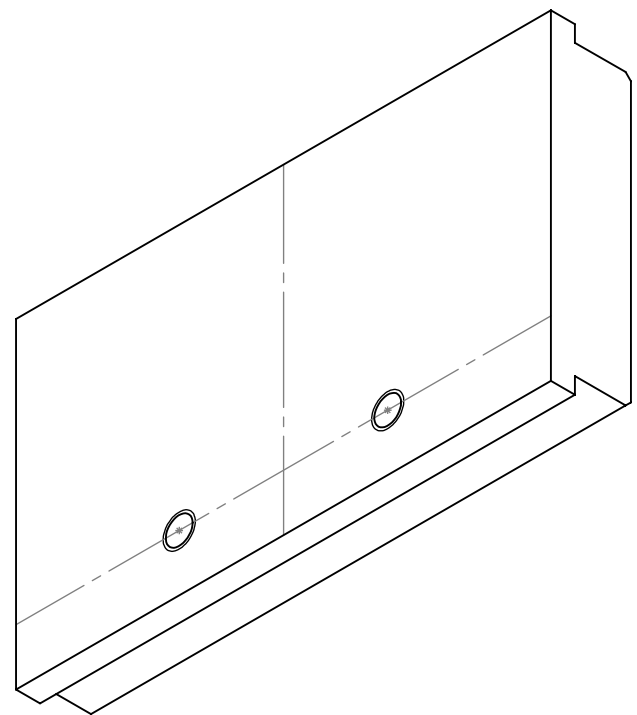
Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 17.11.2016

Kevin Hanelt

Anlage A1: Spannbacke



TITLE:		Backe dickes Blech neu	
DWG NO.		A4	
Ersatz f.:		SHEET 1 OF 1	
Ersetzt d.:			

Anlage A2: Versuchsprotokoll Schweißversuche





















Schweißversuche mit 2achs-Scanner und Pendelachse (7,5 kHz)

25/26.07.2016

Aufgabe	- Naht am Kurzflansch, mit und ohne Kanteneinzug - Kehlnaht am Überlapp
Anlage	Sonne-Anlage
Laser	10 kW FL SM, Versuche bis 5kW Strahlleistung
Optik	- 2-Achs-Scanner für Schweißgeschwindigkeit: Herst.: ScanLab_Typ: intelliSCANde® 30 ____ - 1-Achs-Pendelachse: Hersteller: Raylase _____ Typ: _____ - Kollimator: Hersteller: IPG Photonics _____ Typ: _____ - Fokussierung: Hersteller: SILL Optics _____ Typ: F-Theta _____ → Arbeitsabstand: 587 mm
Vorrichtung	- Schraubstock mit überhöhten Alu-Backen für I-Nähte - „kleiner Spanntisch“ (Eigenkonstr.) für Kehlnaht am Überlapp
Bemerkungen	a) 0,1 mm von Kante auf Oberblech (OB) b) 0,2 mm von Kante auf OB
	Auf Grund des 50 OHM Abschlusswiderstands am Scanner liegen am Scanner nur 50% der an der Spannungsversorgung eingestellten (*) Spannung am Scanner an! * ist die eingestellte Spannung

166 → 10 m/min, 250 → 15 m/min, 333 → 20 m/min, 500 → 30 m/min

Versuche

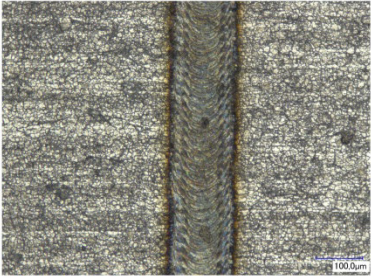




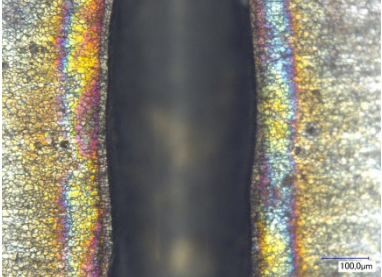

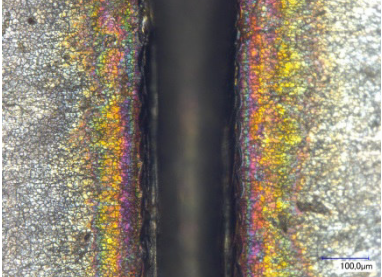

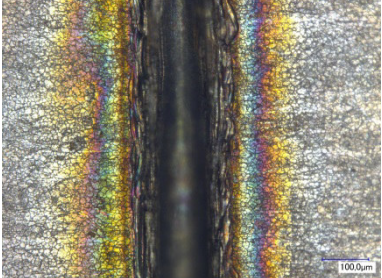
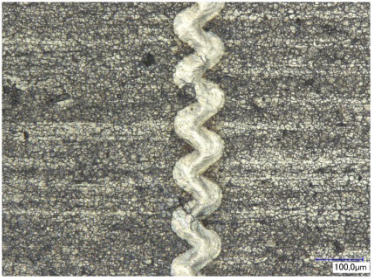

Nr.	PL [kW]	V [mm/s]	Pendel F [kHz]	Pendel U [mV]	Naht	Bemerkungen
1	1,5	166	0	0		leichte Spritzer
2	2	166	0	0		ruhiges Schweißen
3	2,5	166	0	0		sehr ruhiges Schweißen
4	3	166	0	0		sehr ruhiges Schweißen
5	3	166	7,5	300*		ruhiges Schweißen
6	2	166	7,5	300*		ruhiges Schweißen
7	3	333	7,5	300*		sehr ruhiges Schweißen
8	3	333	0	0		
9	4	333	0	0		
10	4	333	7,5	300*		
11	5	333	0	0		
12	5	333	7,5	300*		
13 a	2	166	0	0		Fok: UB, a
14 a	2	166	7,5	300*		
15 a	3	166	0	0		
16 a	3	166	7,5	300*		
17 a	3	333	0	0		
18 a	3	333	7,5	300*		
19 a	4	333	0	0		
20 a	4	333	7,5	300*		




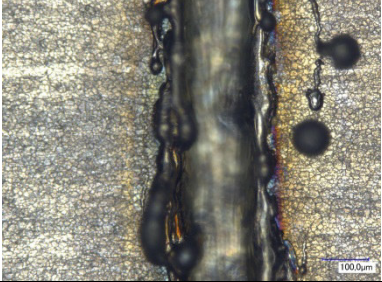
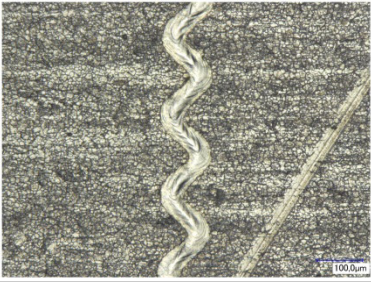



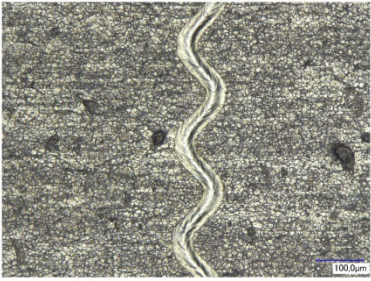

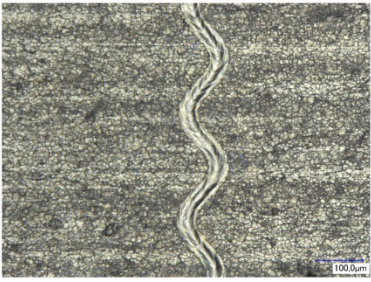

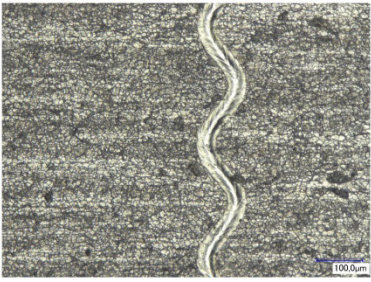
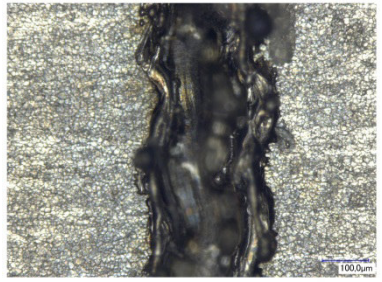
21 a	5	333	0	0	$\frac{V}{-}$	
22 a	5	333	7,5	300*	$\frac{V}{-}$	Viel Funkenflug !
23 a	5	500	0	0	$\frac{V}{-}$	
24 a	5	500	0	0	$\frac{V}{-}$	Fok: +5 UB
25 a	5	333	0	0	$\frac{V}{-}$	Fok: +5 UB
26 a	5	333	0	0	$\frac{V}{-}$	Fok: -5 UB
27 a	5	333	0	0	$\frac{V}{-}$	Fok: -10 UB, a
28 b	5	333	0	0	$\frac{V}{-}$	Fok: -10 UB, b
29 b	5	250	0	0	$\frac{V}{-}$	Fok: -10 UB

Die mit **rot** markierten Versuche waren aus zeitlichen Gründen nicht als Schliffproben auswertbar und entfallen somit auch für Zugversuche.

**Anlage A3: Nahtvergleich bei steigender Geschwindigkeit
und unterschiedlicher Leistung**

Tabelle 1: Nahtvergleich bei steigenden Vorschubgeschwindigkeiten und unterschiedlicher Leistung bei 8 kHz Frequenz

Vorschubgeschwindigkeit [m/min]	Laserleistung: 500W (cw)	Laserleistung: 1000W (cw)
10		
15		
20		
30		
40		
50		

60		
70		
80		
90		
100		
110		
120		

Anlage A4: Ergebnisse aus Zugversuch und Querschliffen

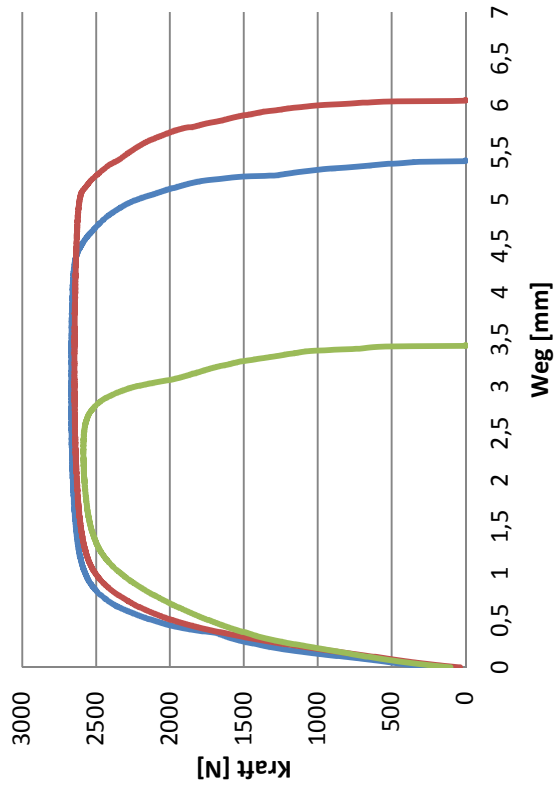
Nr.	Naht	Parameter	Schliffproben	Zugversuchsproben
1	I-Naht KE	1,5kW, 166mm/s	Tiefe: 1960 µm, Nahteinfall	
	I-Naht KF		Tiefe: 2098 µm	
2	I-Naht KE	2kW, 166mm/s	Tiefe: 2075 µm, Nahteinfall	
	I-Naht KF		Tiefe: 2526 µm, Nahteinfall	
3	I-Naht KE	2,5kW, 166mm/s	Tiefe: 2944 µm	Fm=1066,5N; an Naht abgerissen, leichte Nahtablösung
	I-Naht KF		Tiefe: 3026 µm, Nahteinfall	Fm=1057,7N; an der Naht abgelöst
4	I-Naht KE	3kW, 166mm/s	Tiefe: 3657 µm, Nahteinfall	Fm=1196,87N; an Naht abgerissen
	I-Naht KF		Tiefe: 4106 µm, leichter Nahteinfall	Fm=1049,37N; an Naht abgerissen ; leichte Nahtablösung
5*	I-Naht KE	3kW, 166mm/s	Tiefe: 3758 µm, Nahteinfall	Fm=1158,53N; an der Naht abgerissen
	I-Naht KF		Tiefe: 4118 µm, Nahteinfall	Fm=1151,67N; an der Naht abgerissen
6*	I-Naht KE	2kW, 166mm/s	Tiefe: 2182 µm, Nahteinfall	
	I-Naht KF		Tiefe: 3214 µm	
7*	I-Naht KE	3kW, 333mm/s	Tiefe: 2871 µm, Poren	
	I-Naht KF		Tiefe: 2372 µm, Humping	
8	I-Naht KE	3kW, 333mm/s	Tiefe: 2655 µm	Fm=1048,47N; an der Naht abgerissen; starke Nahtablösung
	I-Naht KF		Tiefe: 3052 µm, Nahteinfall, Humping	Fm=994,23N; an der Naht abgerissen; leichte Nahtablösung
9	I-Naht KE	4kW, 333mm/s	Tiefe: 3473 µm	Fm=1027,73N; an der Naht gerissen, leichte Nahtablösung
	I-Naht KF		Tiefe: 3755 µm	Fm=955,67N; an der Naht gerissen, leichte Nahtablösung
10*	I-Naht KE	4kW, 333mm/s	Tiefe: 2976 µm, Nahteinfall	Fm=1016,07N; an der Naht gerissen, leichte Nahtablösung
	I-Naht KF		Tiefe: 3322 µm, Nahteinfall	Fm=853,83N; an der Naht gerissen, leichte Nahtablösung
11	I-Naht KE	5kW, 333mm/s	Tiefe: 4370 µm, Poren	Fm=1093,17N; an der Naht gerissen
	I-Naht KF		Tiefe: 4792 µm, Nahteinfall	Fm=962,07N; an der Naht gerissen
12*	I-Naht KE	5kW, 333mm/s	Tiefe: 3132 µm, Nahteinfall	Fm=1059,6N; an der Naht gerissen
	I-Naht KF		Tiefe: 3764 µm	Fm=936,87N; an der Naht gerissen
12s*	I-Naht KE	5kW, 500mm/s	Kein Querschliff	Fm=957,07N; an der Naht gerissen
	I-Naht KF		Kein Querschliff	

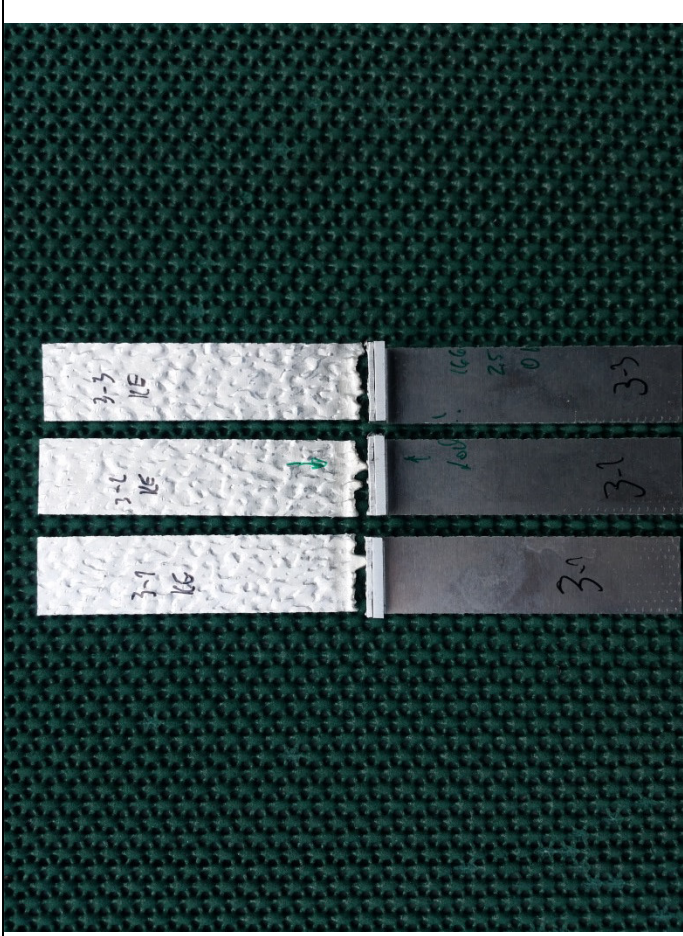
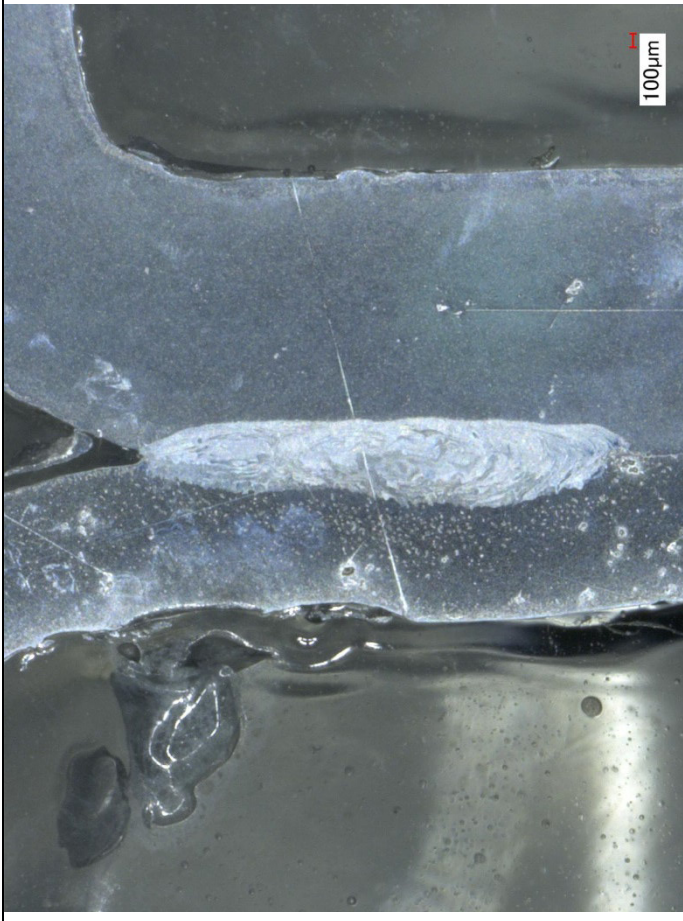
13	ÜKN	2kW, 166mm/s	Ungenügend verbunden	
13a	ÜKN	2kW, 166mm/s	Verbunden	
14a*	ÜKN	2kW, 166mm/s	Verbunden, Riss	
15a	ÜKN	3kW, 166mm/s	Weggelassen	
16a*	ÜKN	3kW, 166mm/s	Weggelassen	
17a	ÜKN	3kW, 333mm/s	Verbunden	
18a*	ÜKN	3kW, 333mm/s	Nicht verbunden	
19a	ÜKN	4kW, 333mm/s	Verbunden	
20a*	ÜKN	4kW, 333mm/s	Kaum verbunden	
21a	ÜKN	5kW, 333mm/s	Kaum verbunden	
22a*	ÜKN	5kW, 333mm/s	Verbunden	
23a	ÜKN	5kW, 500mm/s	Ungenügende Verbindung	

*mit 7,5 kHz und 150 mV gependelt

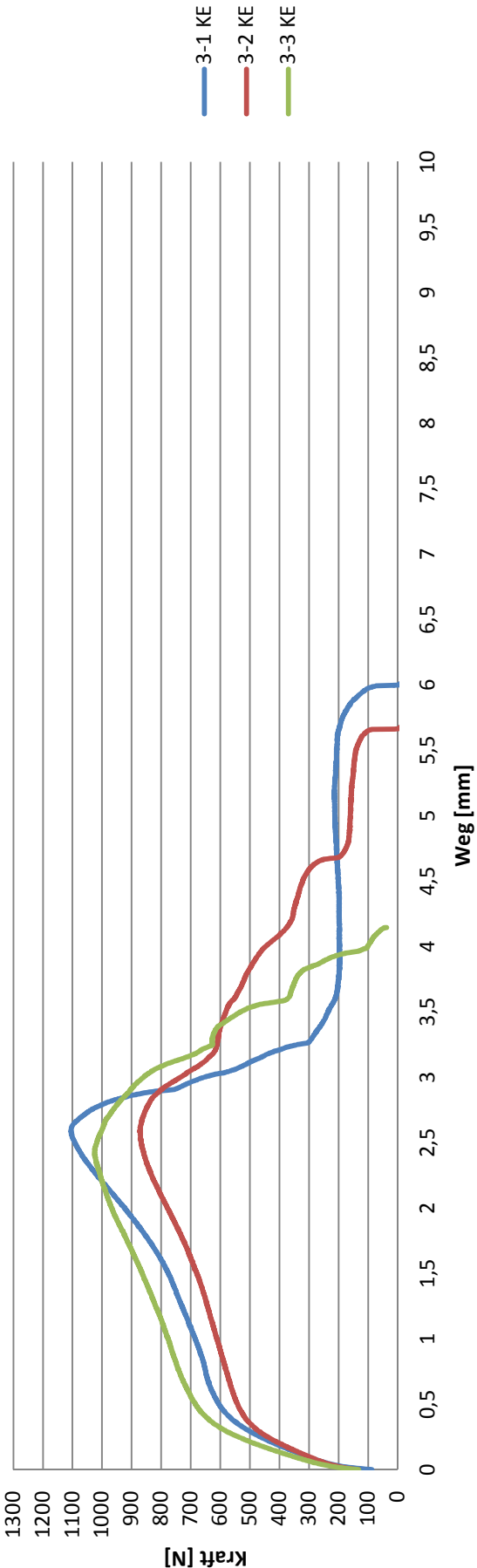
Anlage A5: Parameter, Querschliffe, Zugkurven und Bruchkanten

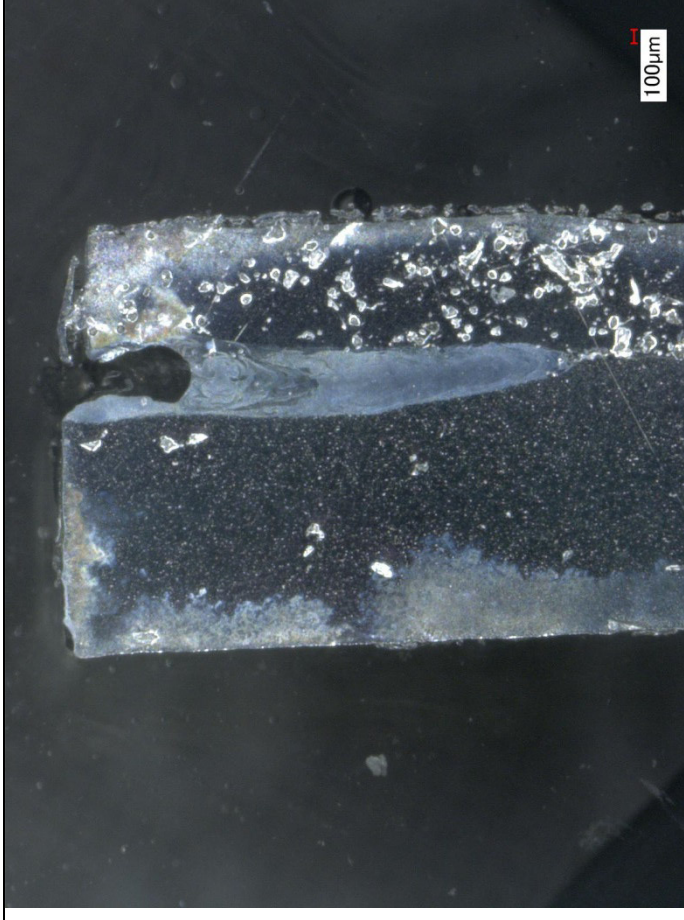
GM



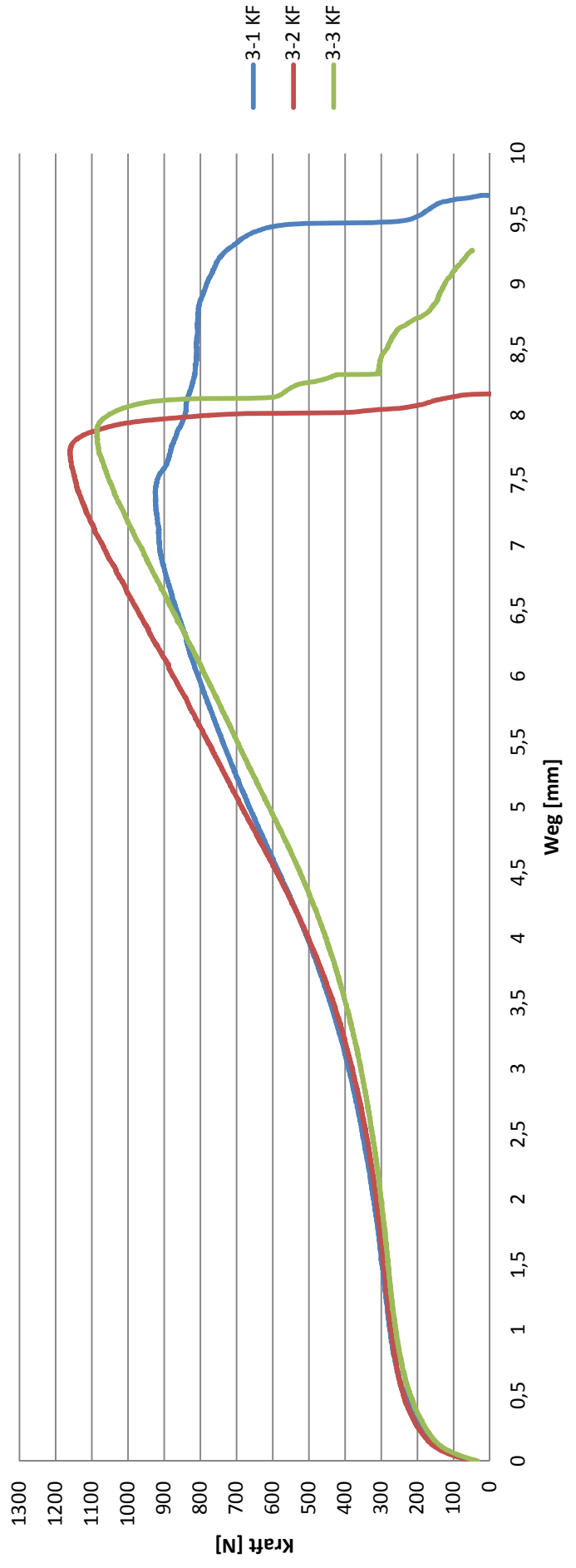


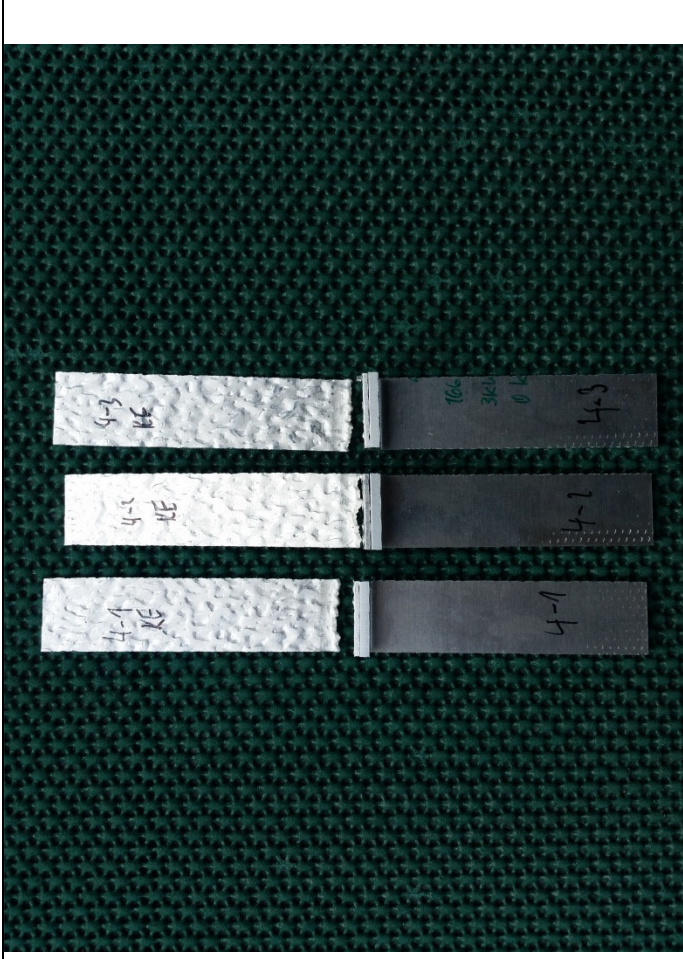
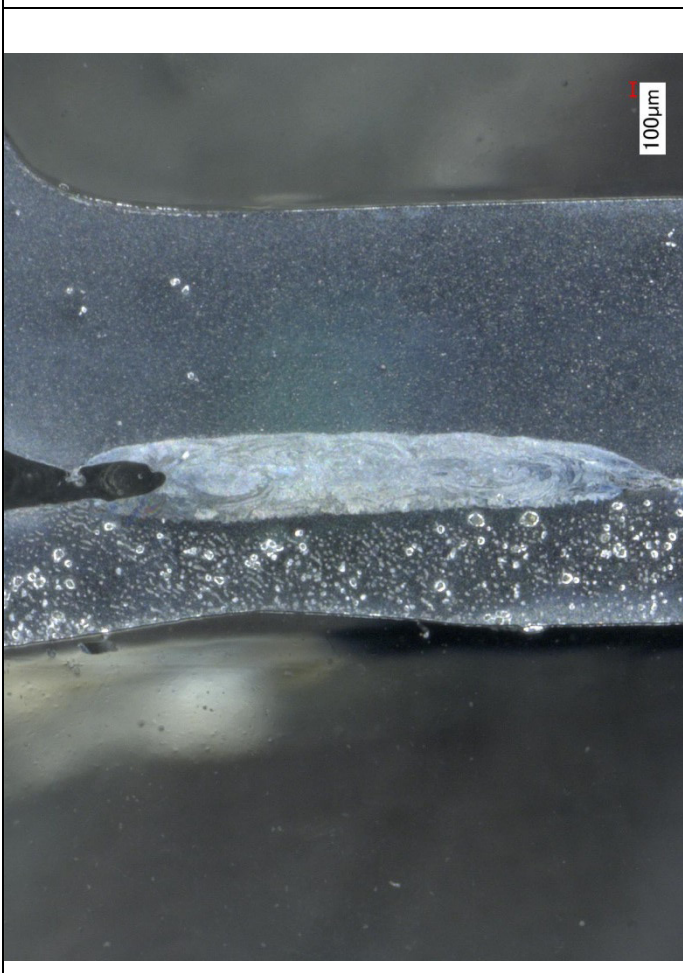
3 KE



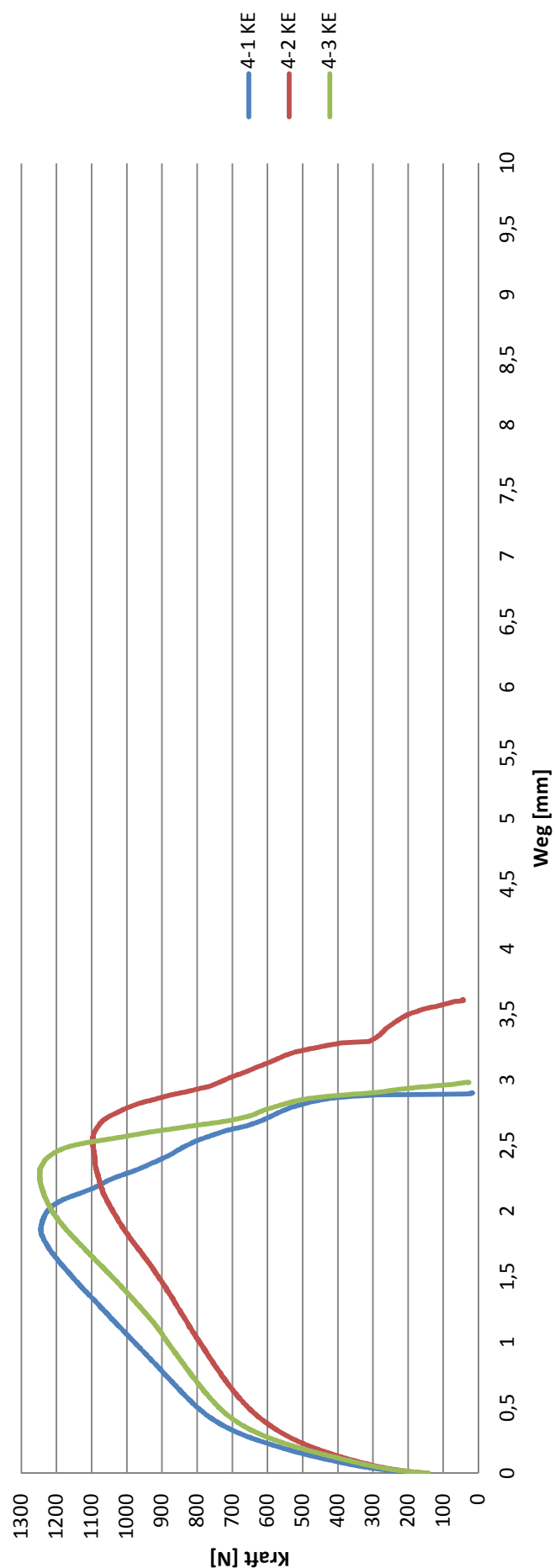


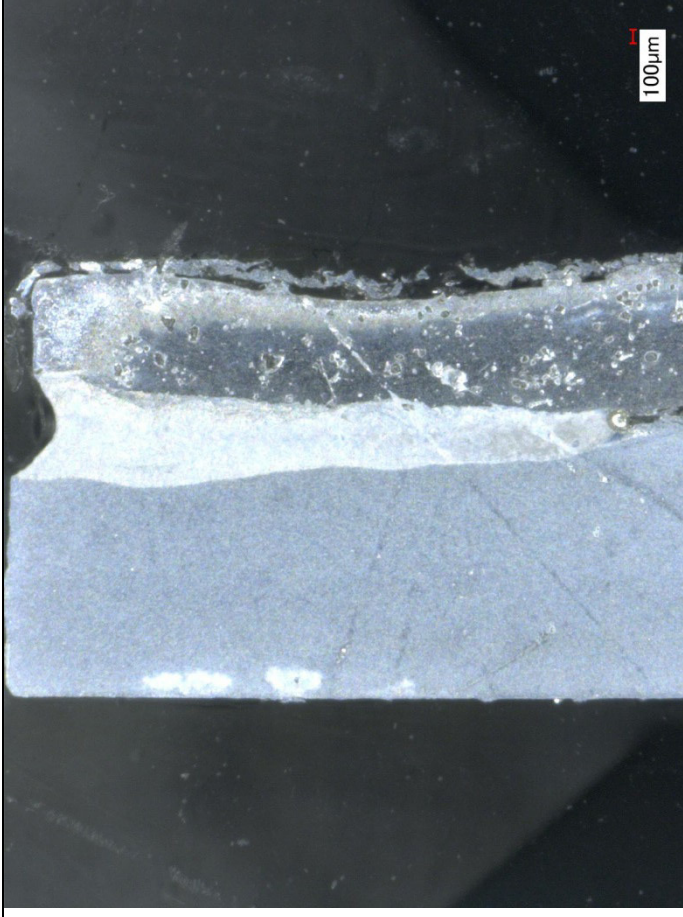
3 KF



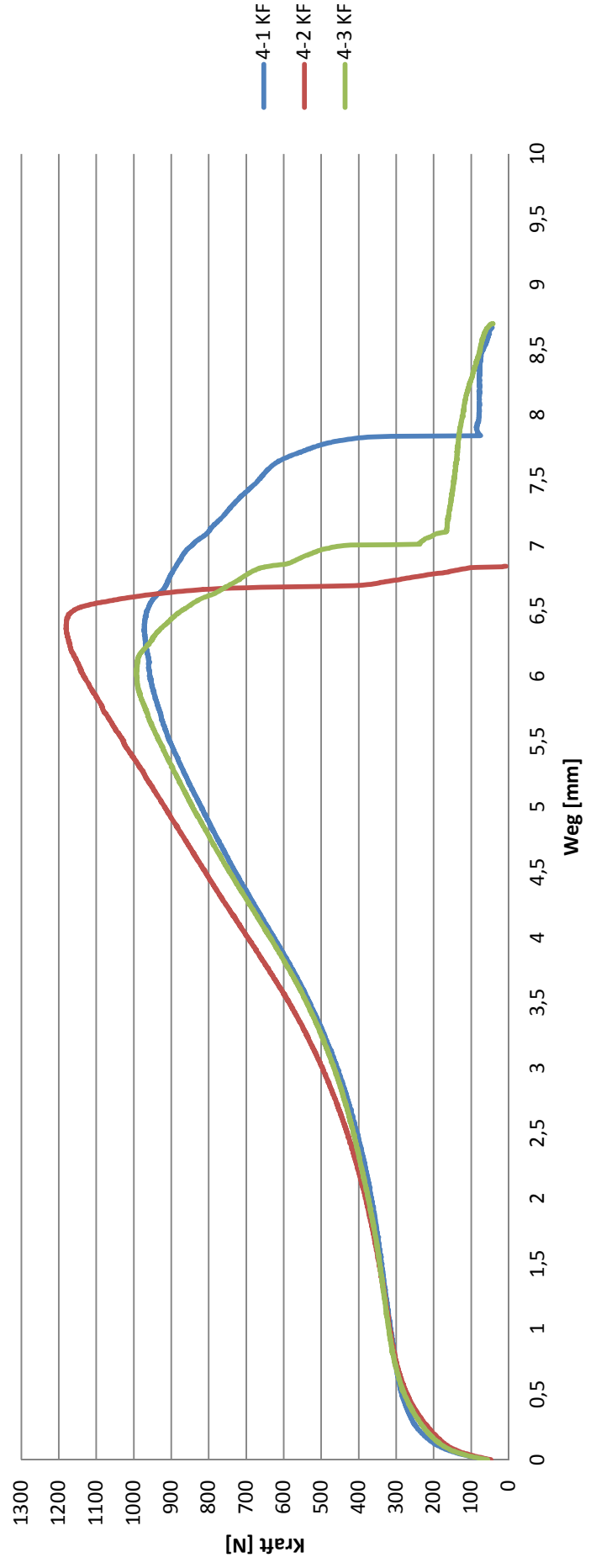


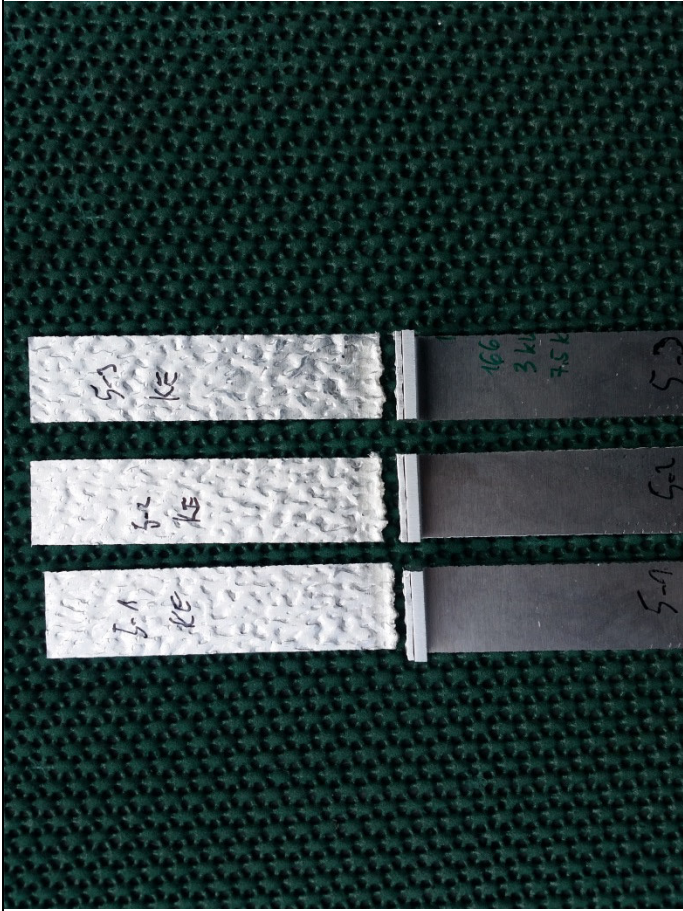
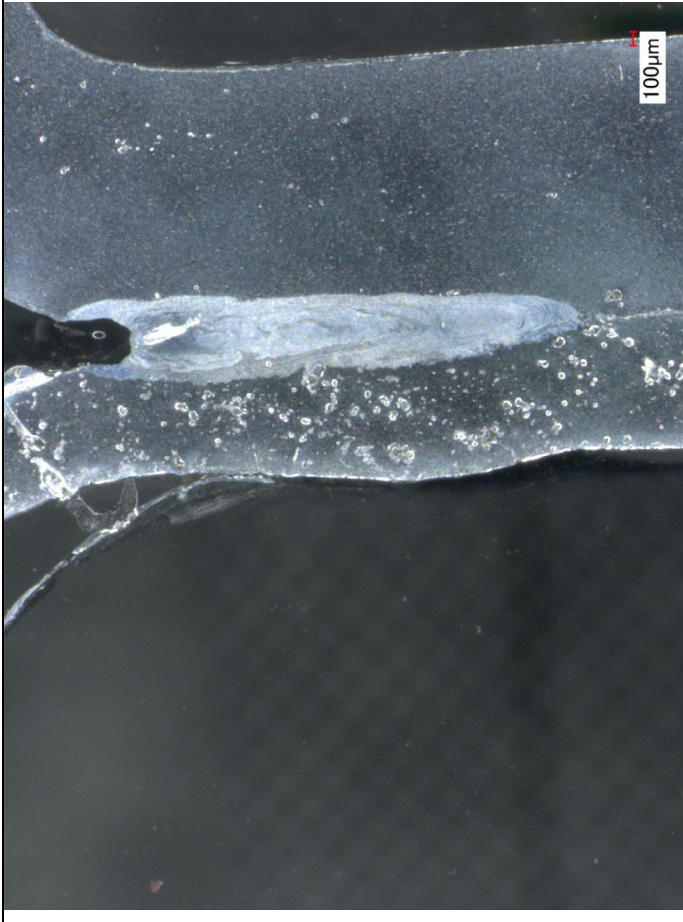
4 KE



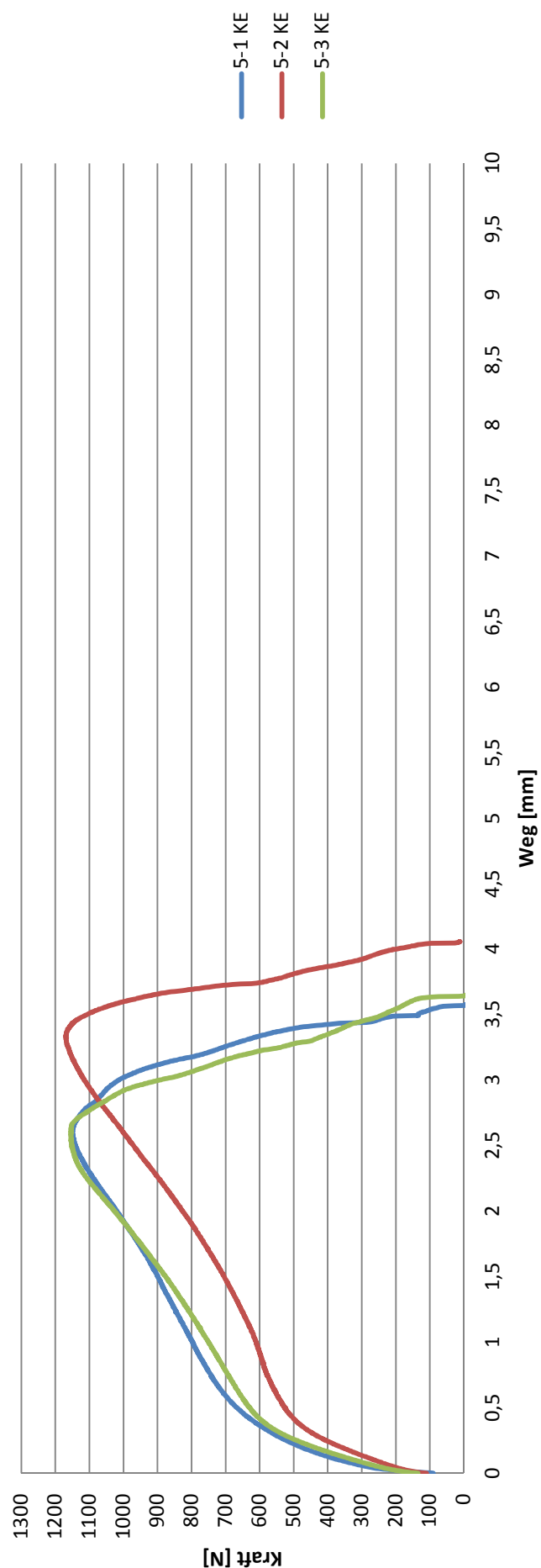


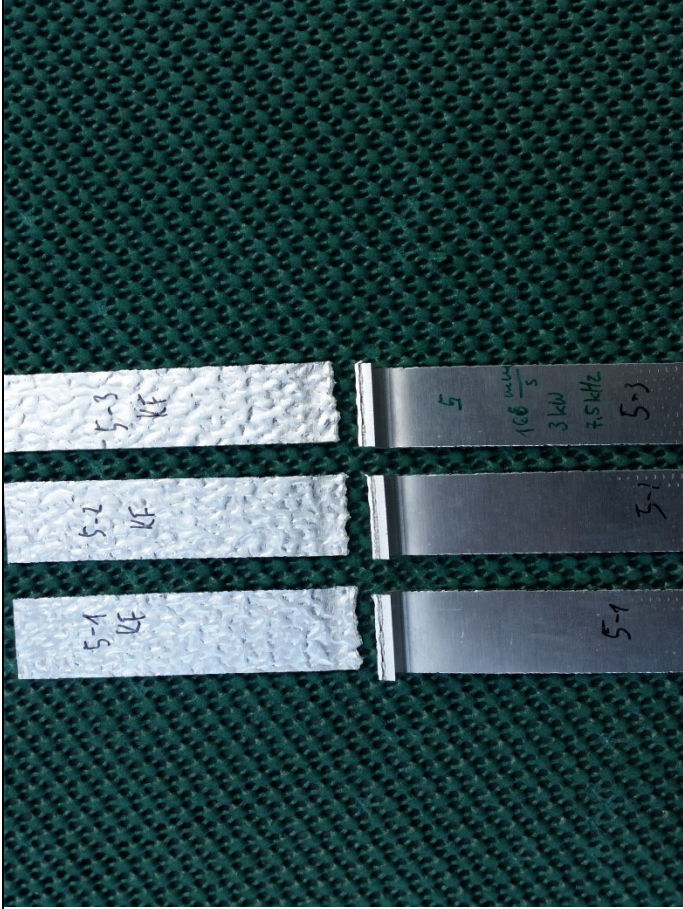
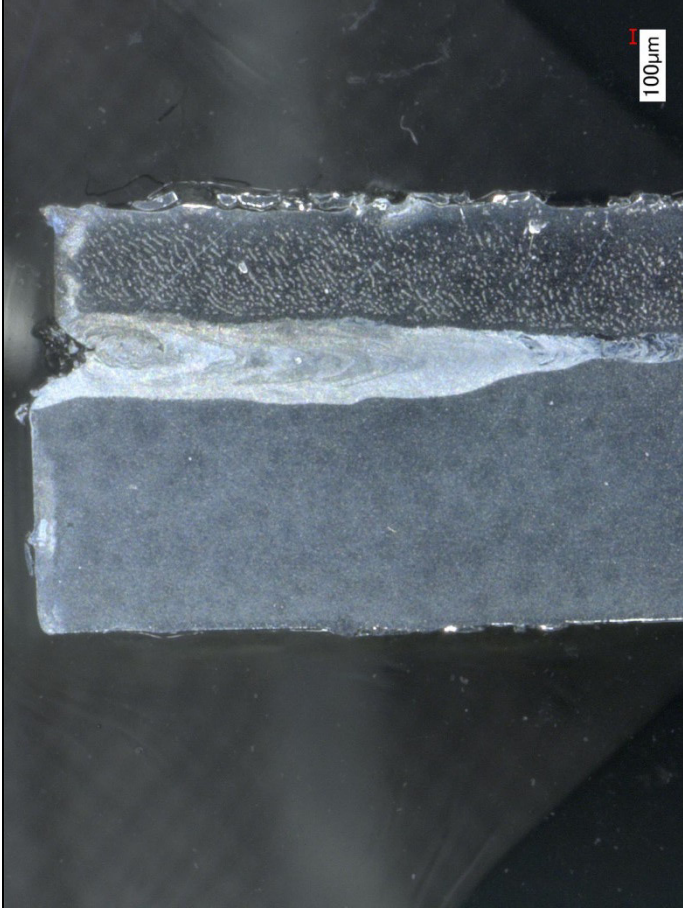
4 KF



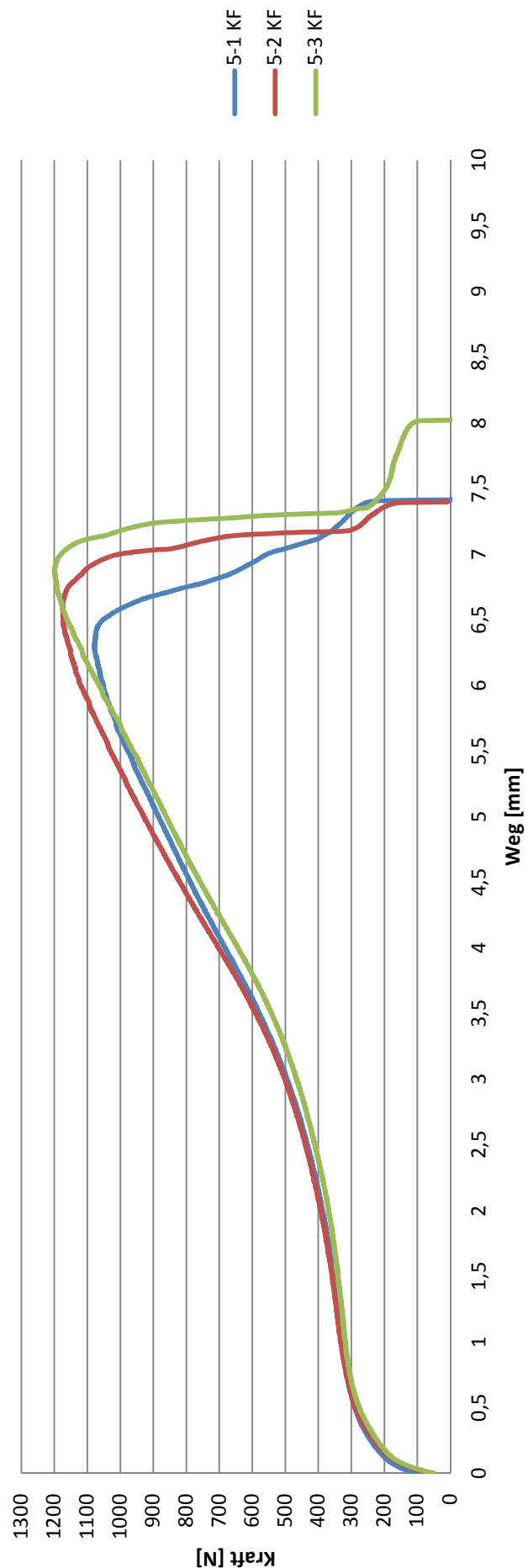


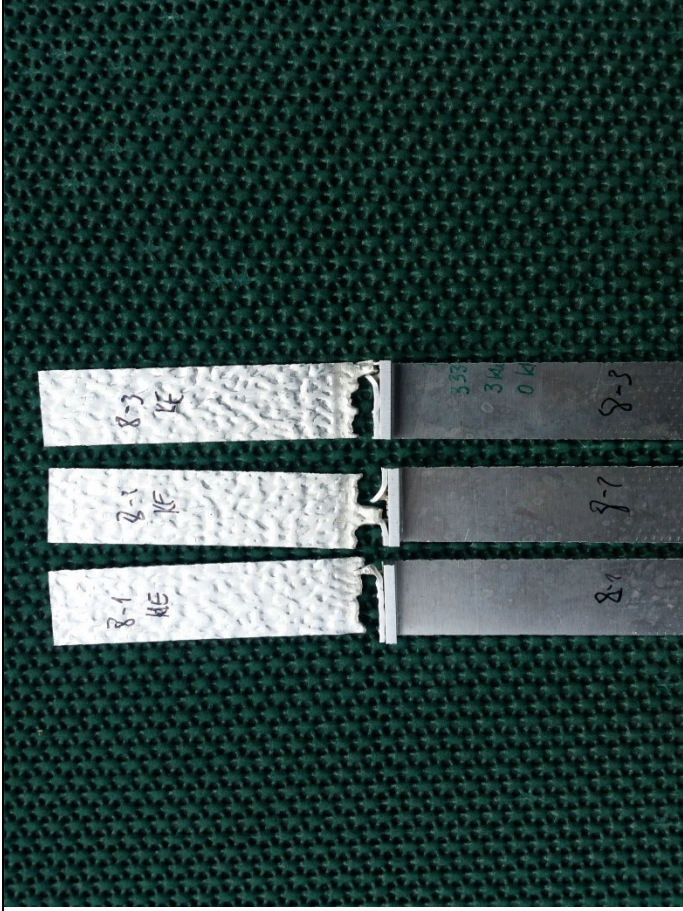
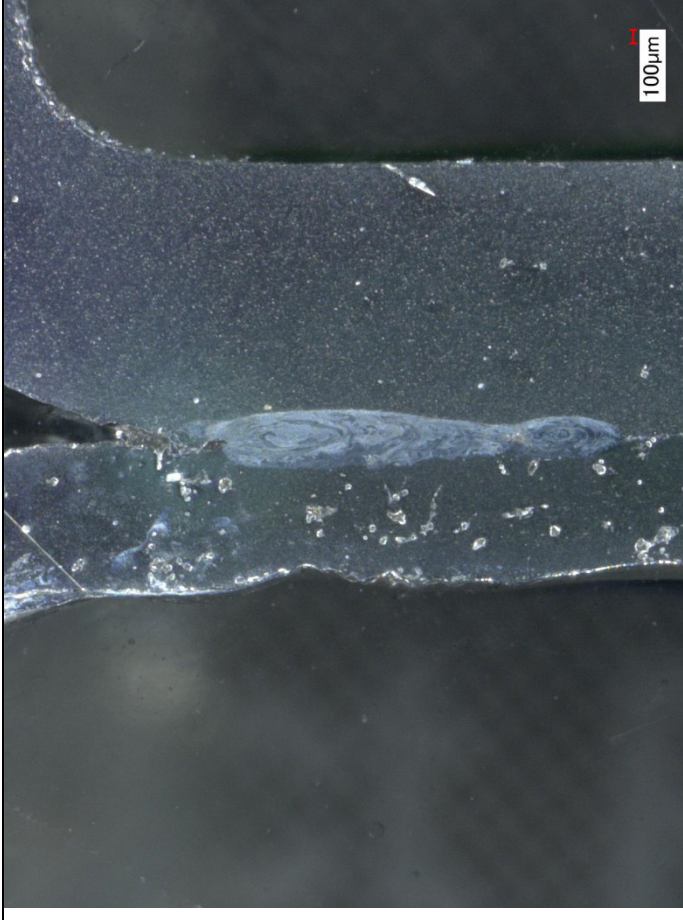
5 KE



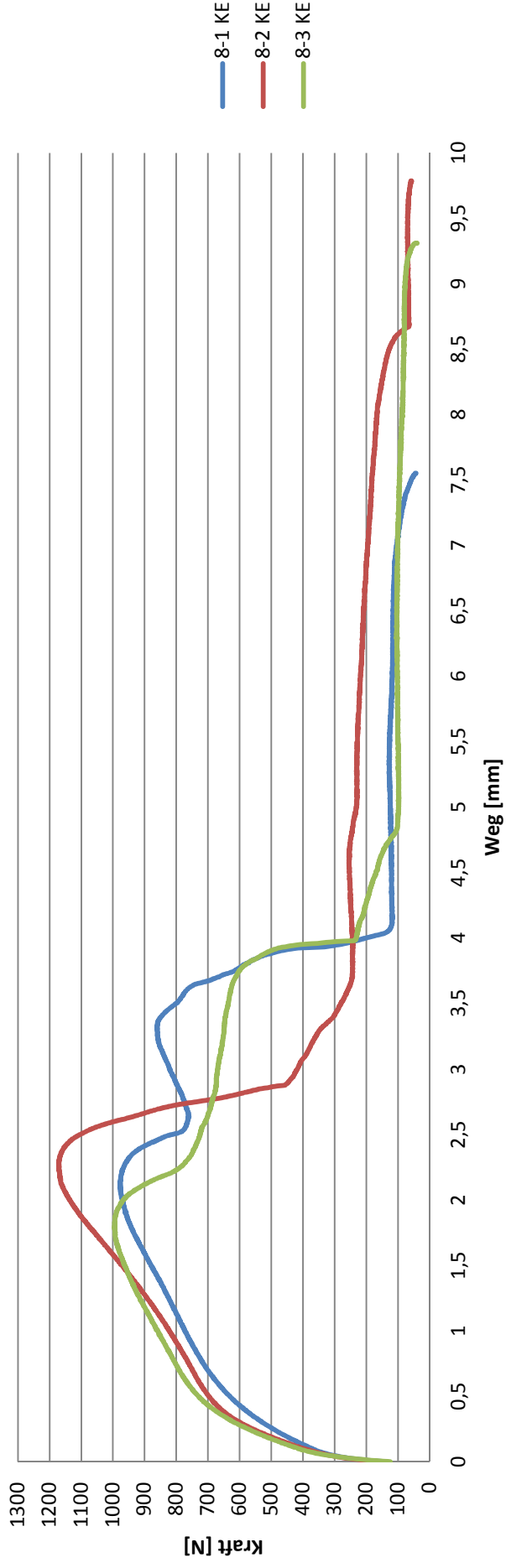


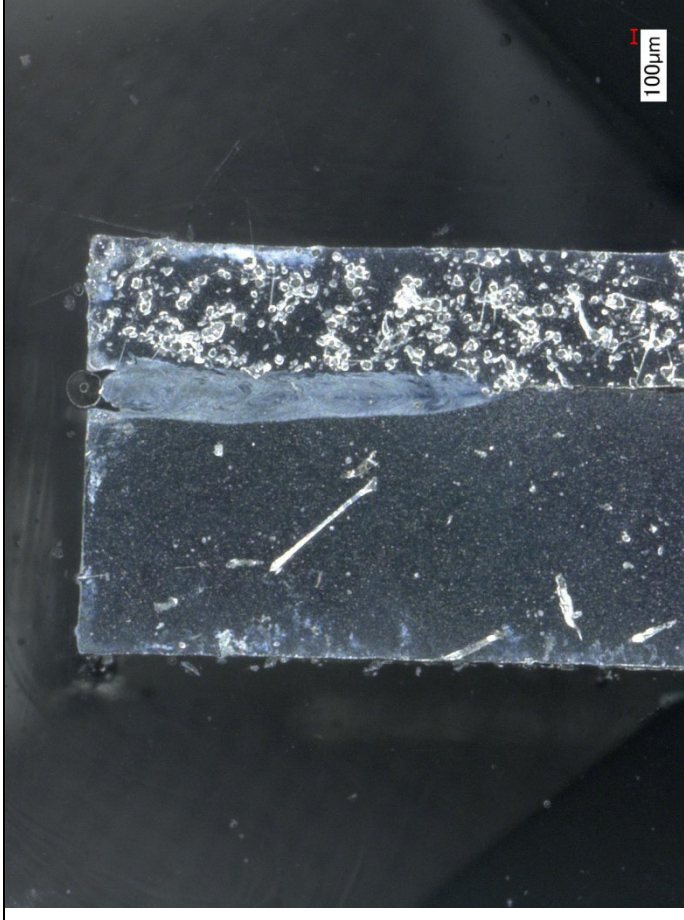
5 KF



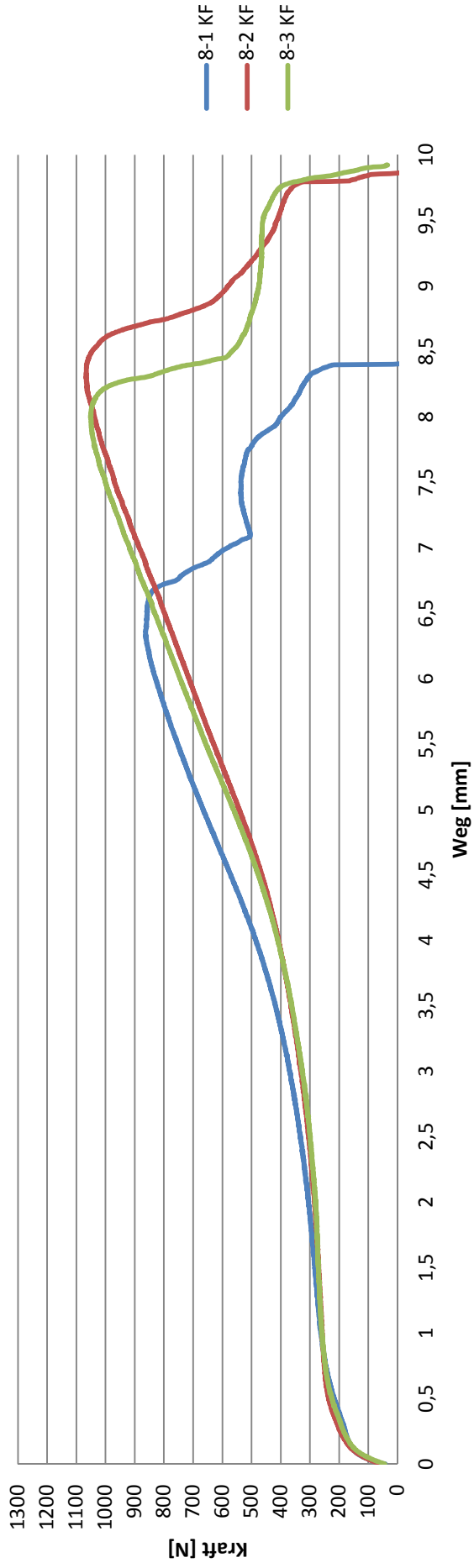


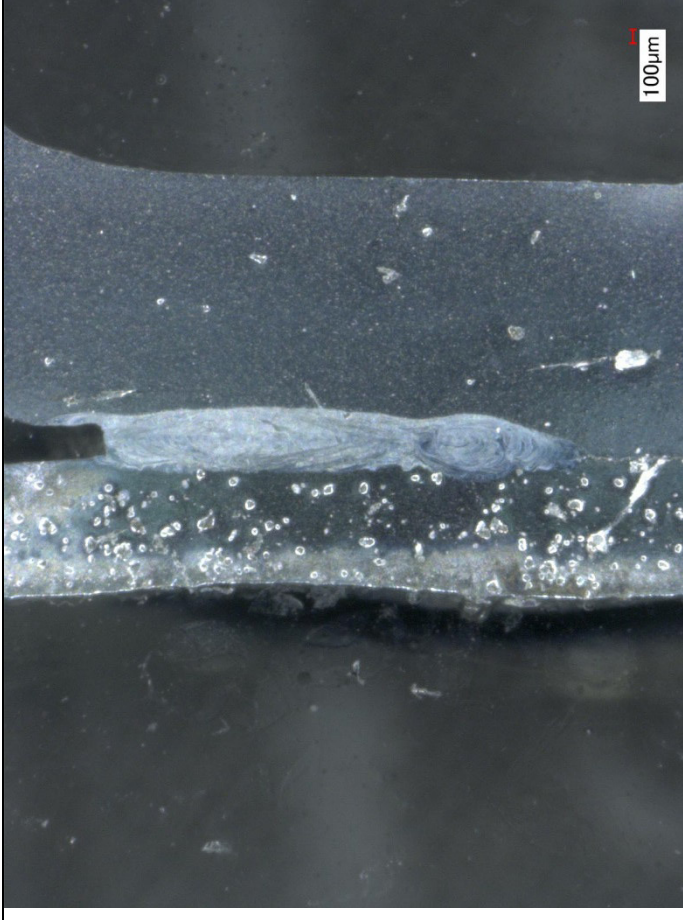
8 KE



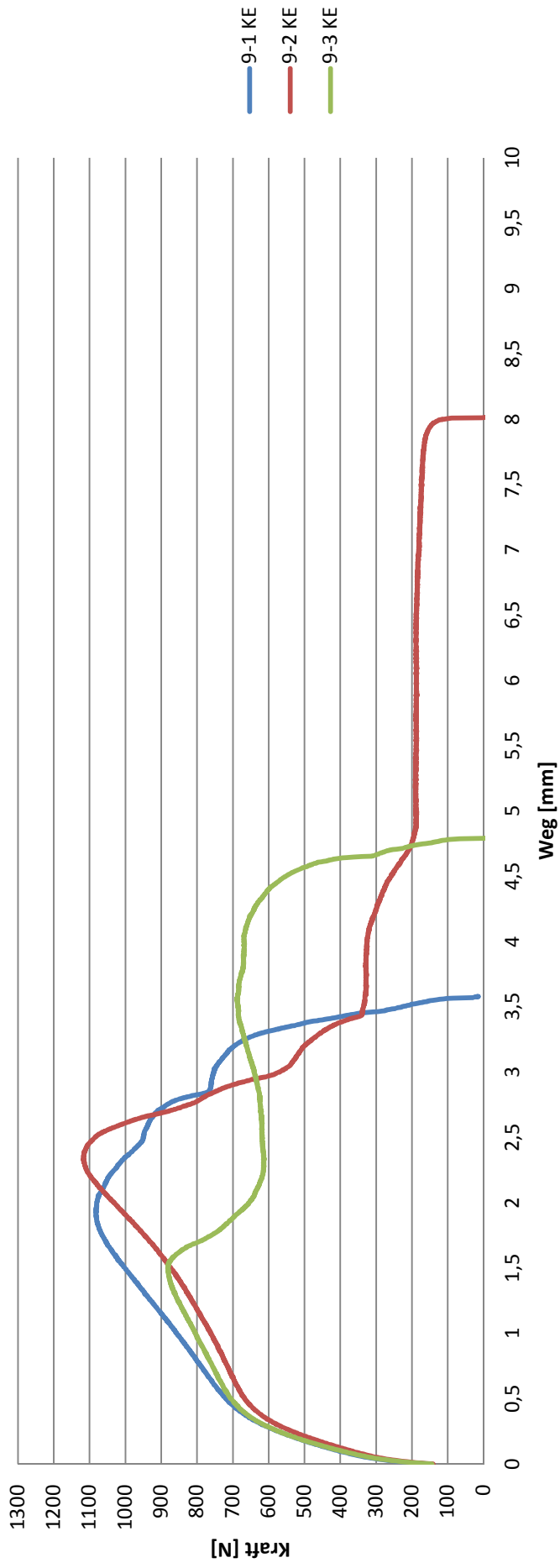


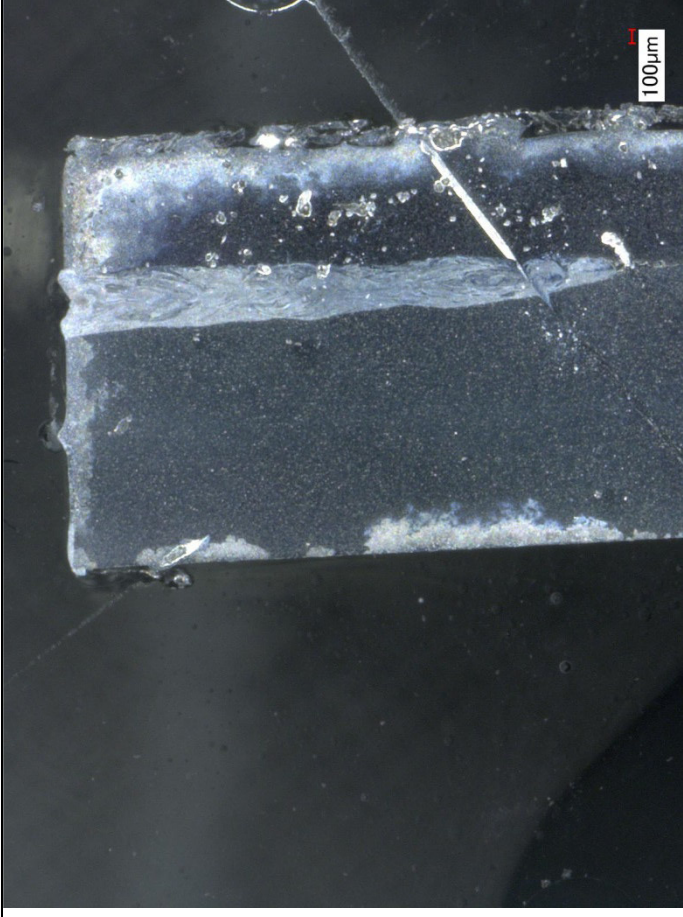
8 KF



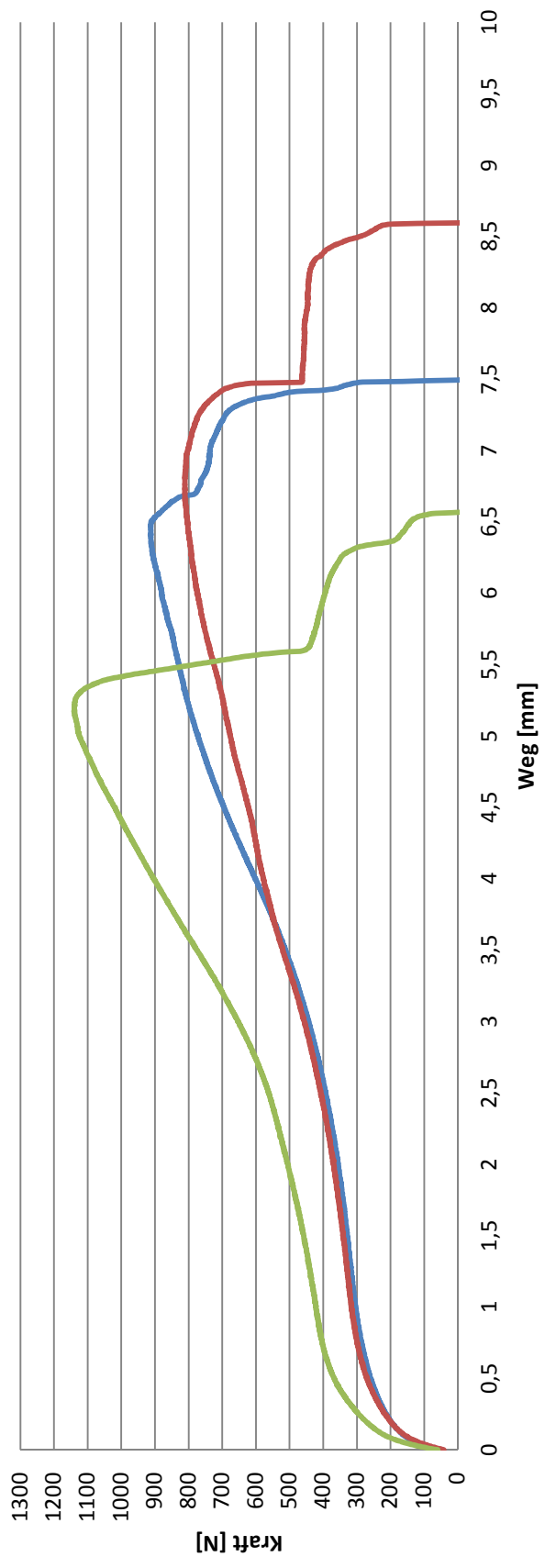


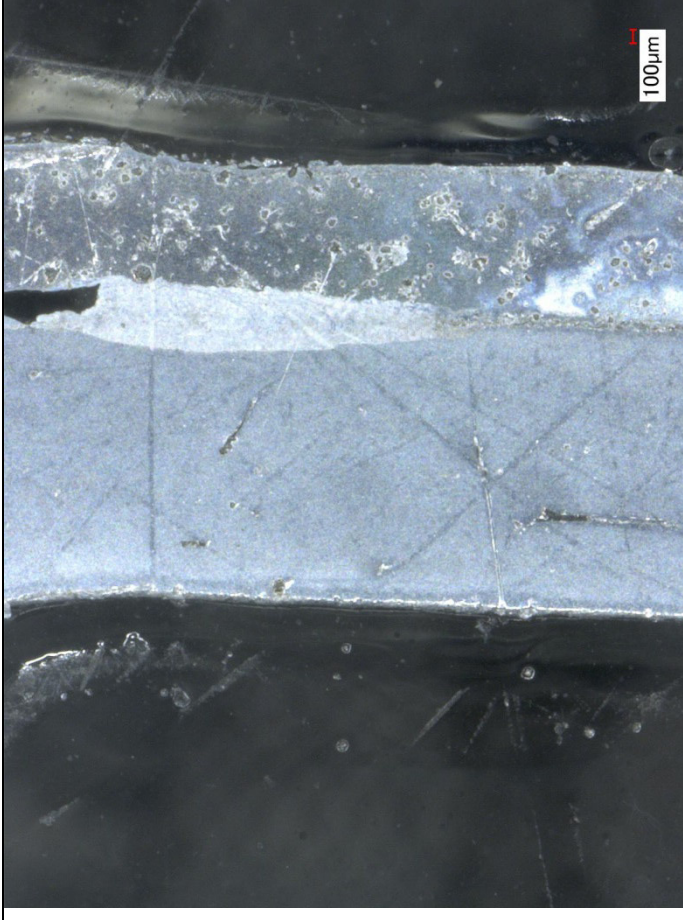
9 KE



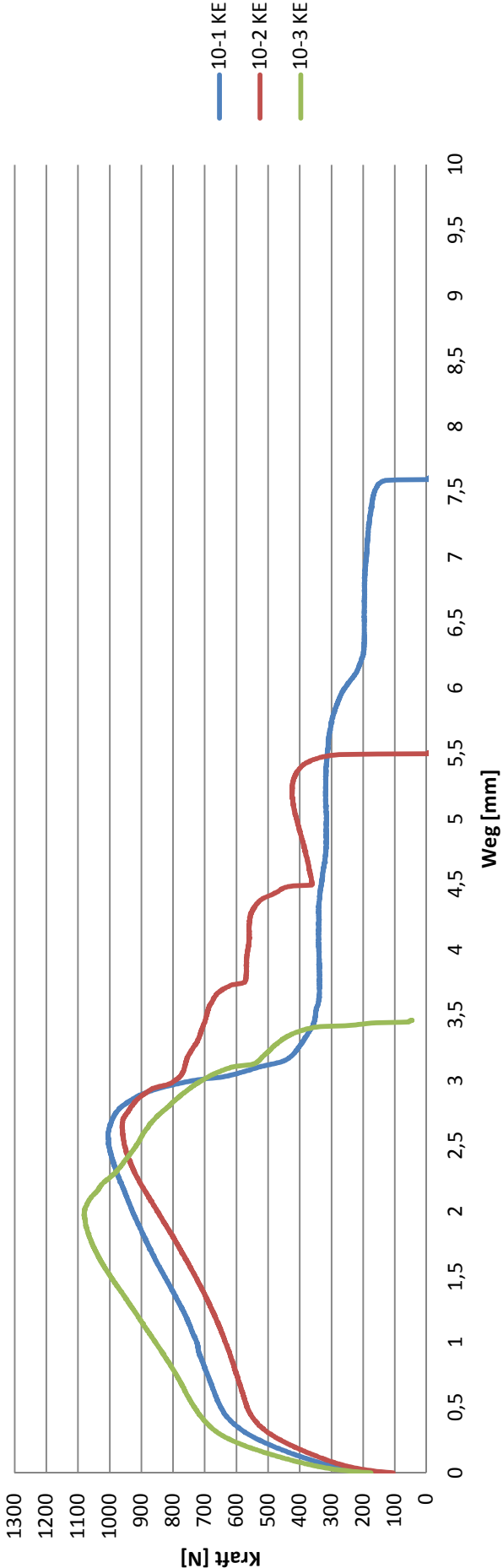


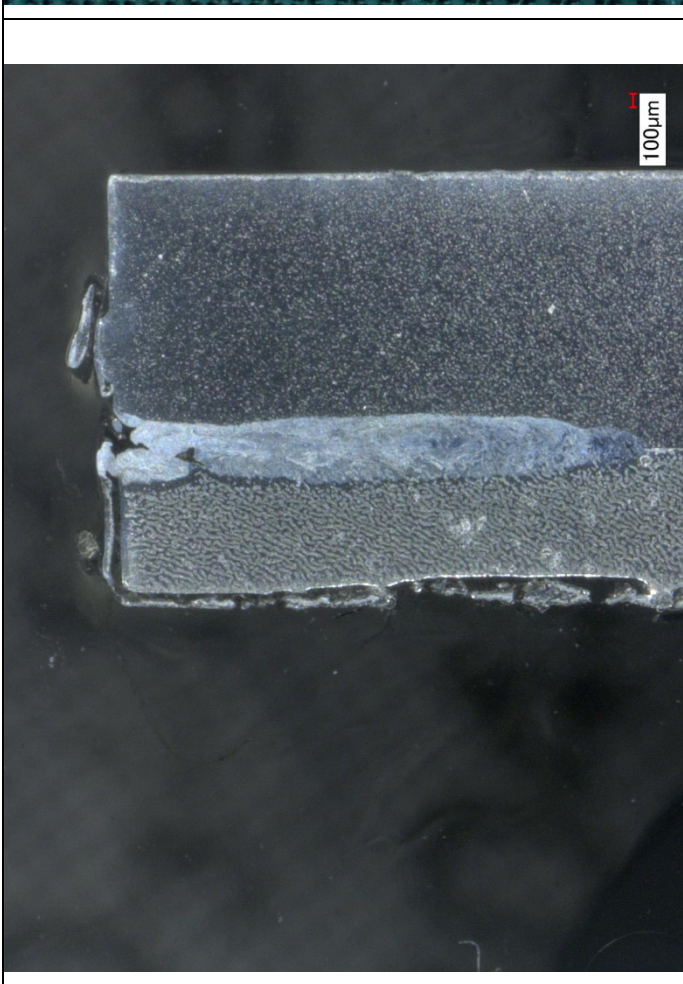
9 KF



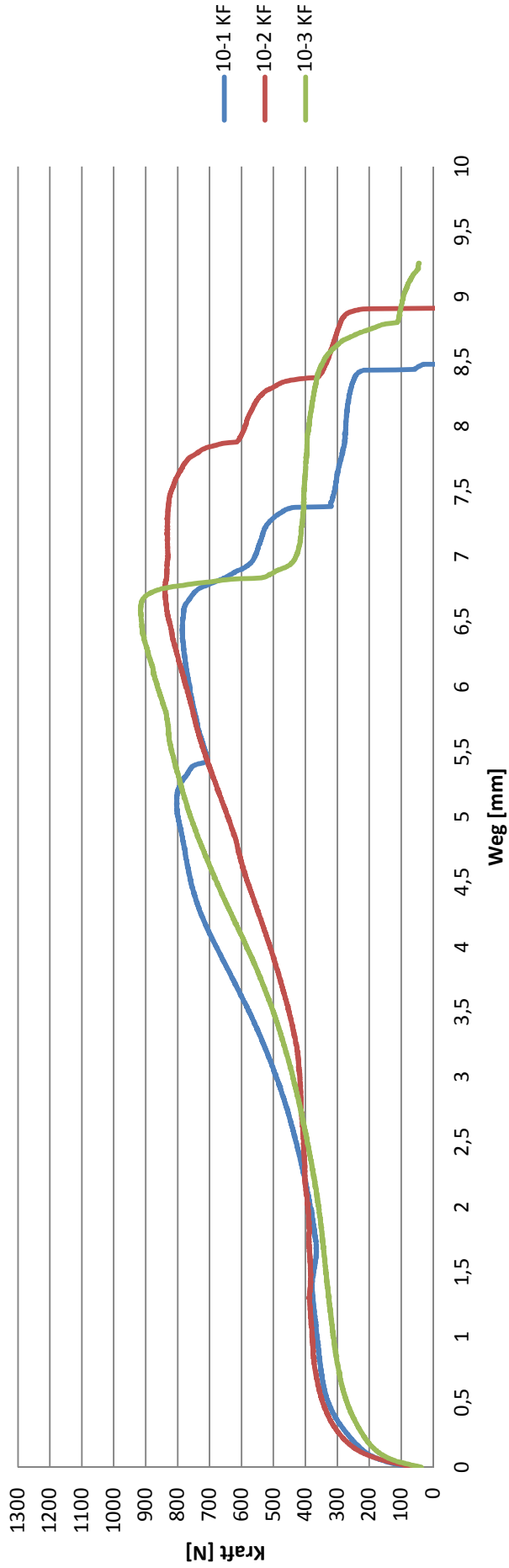


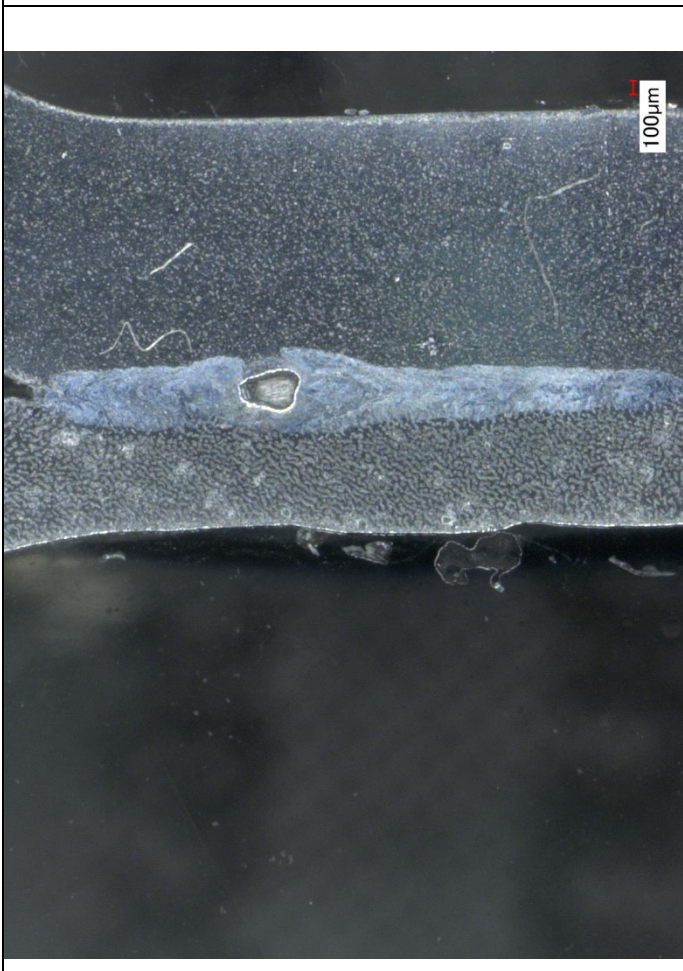
10 KE



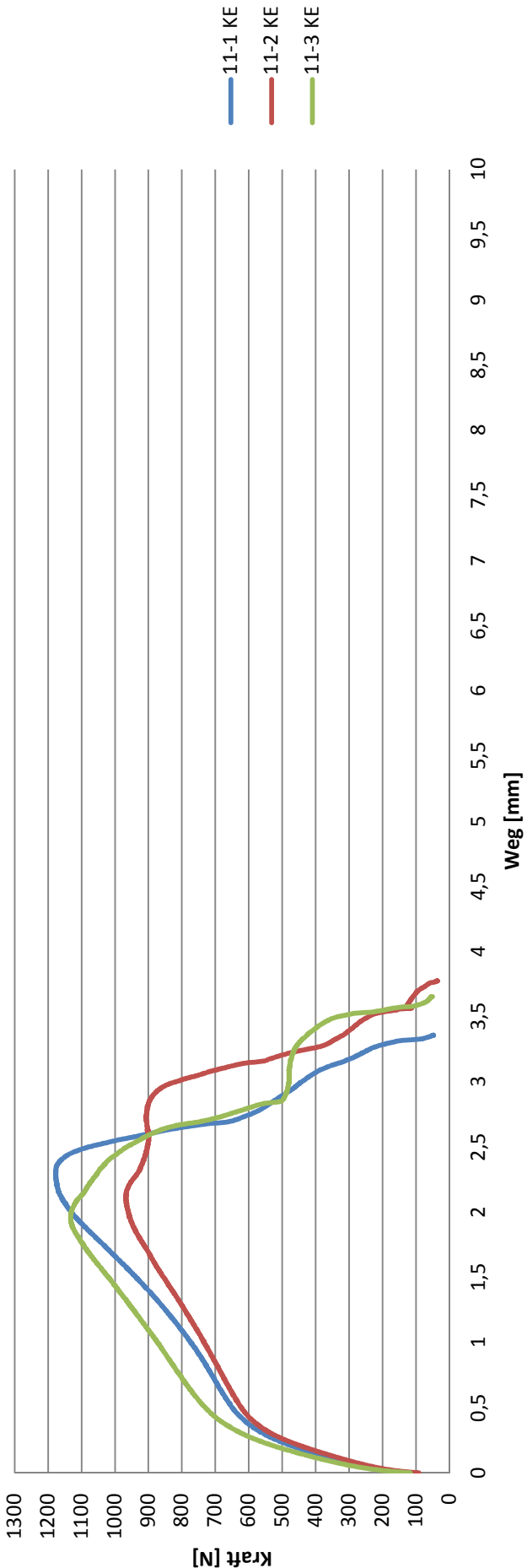


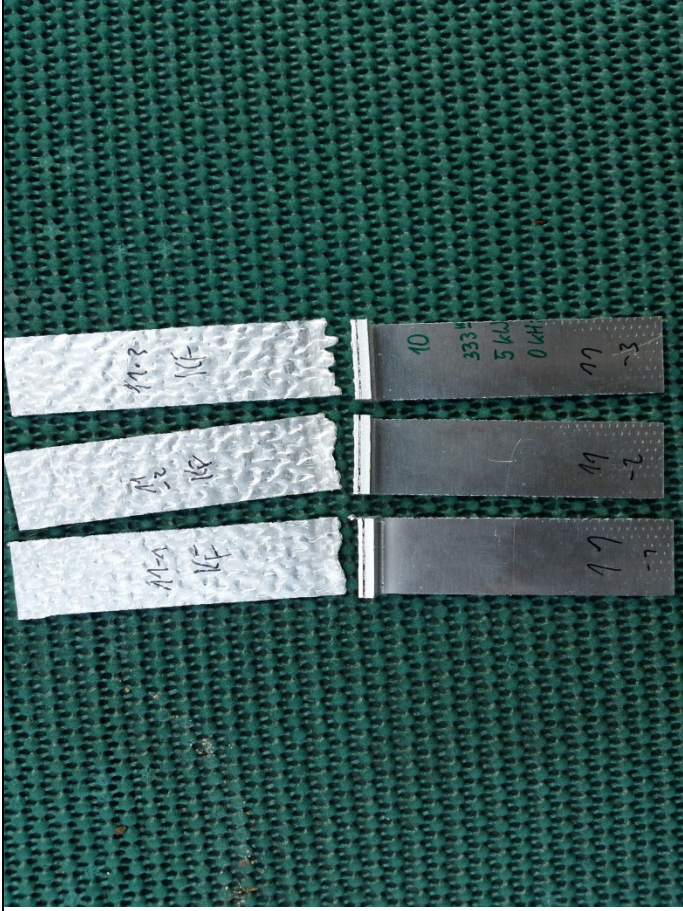
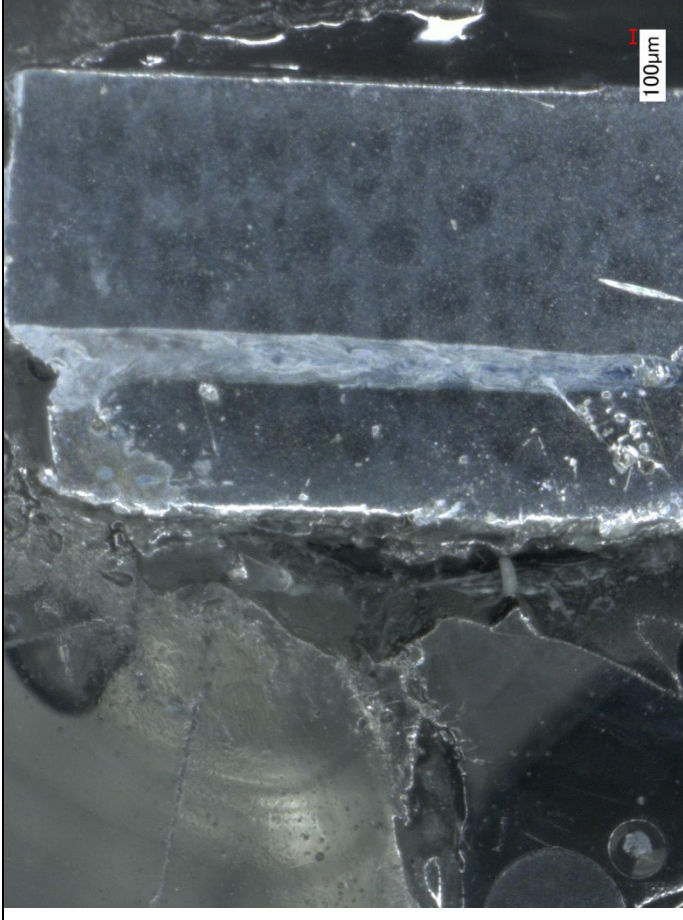
10 KF



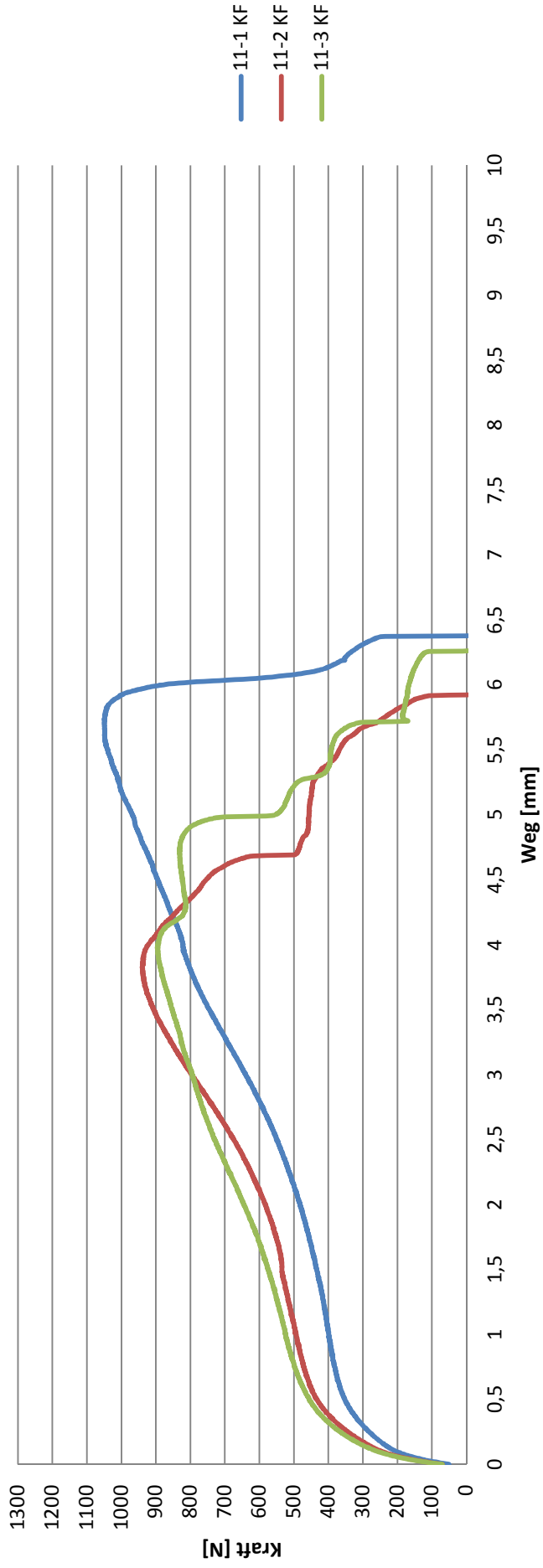


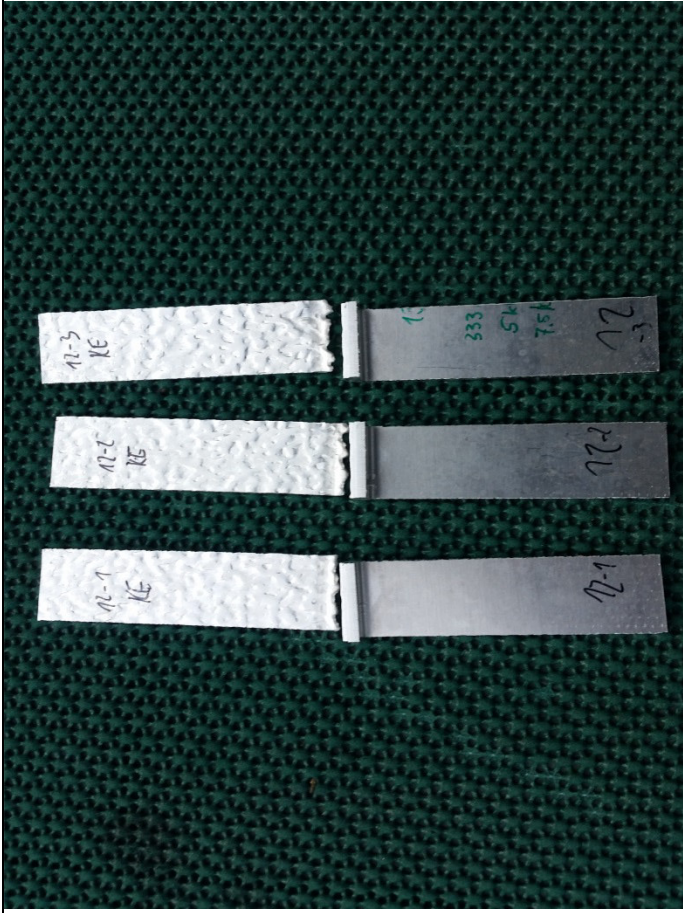
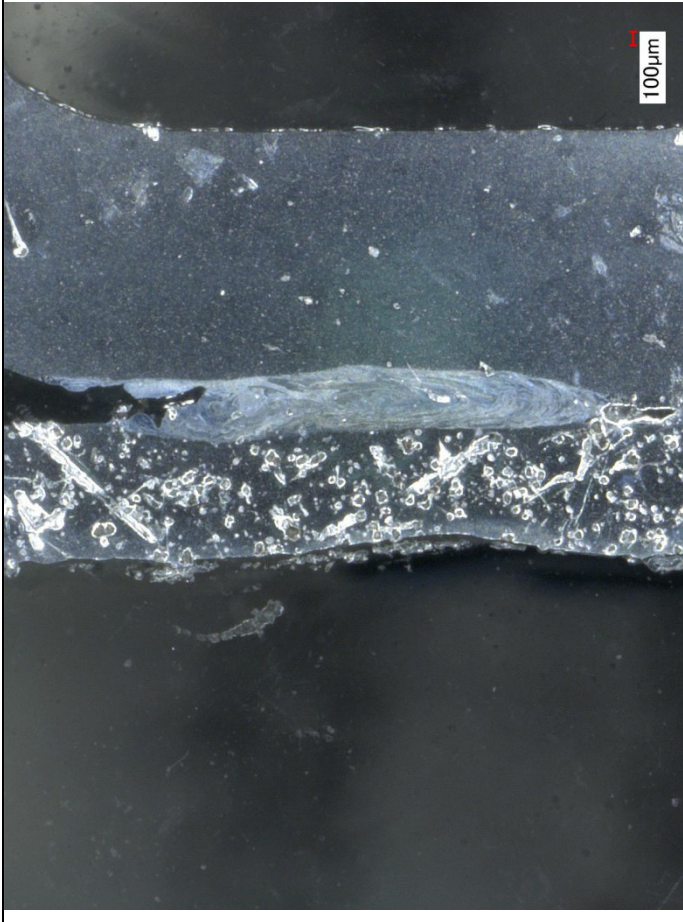
11 KE



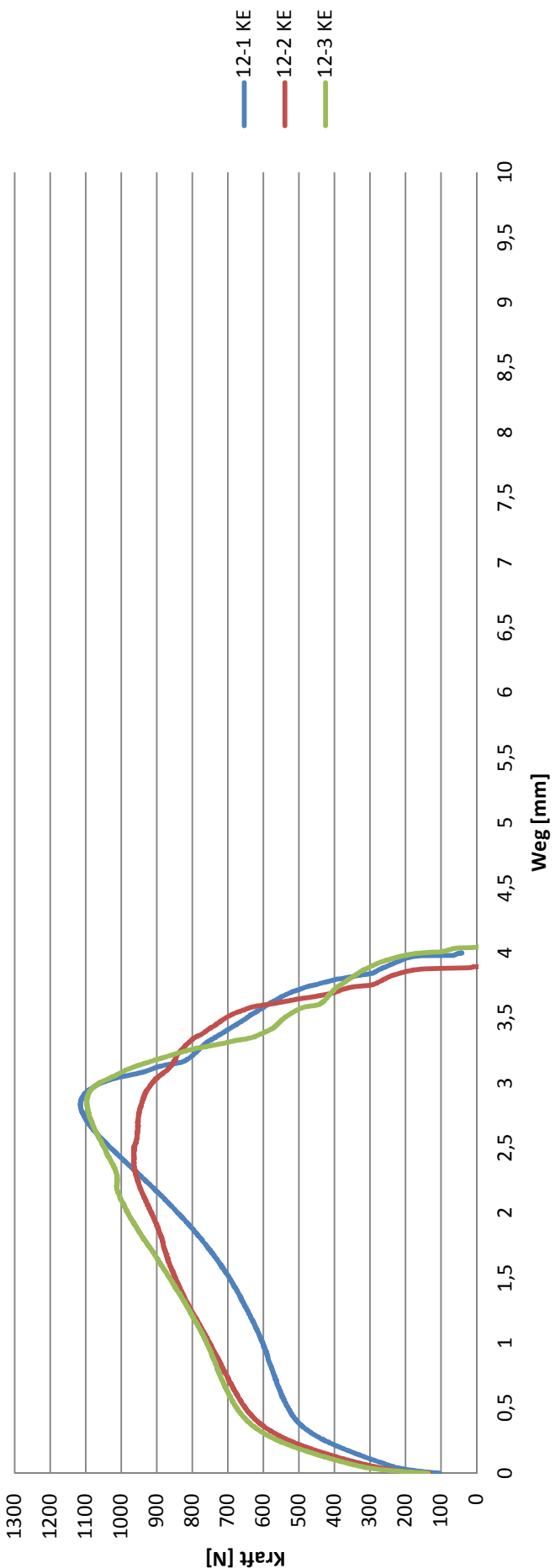


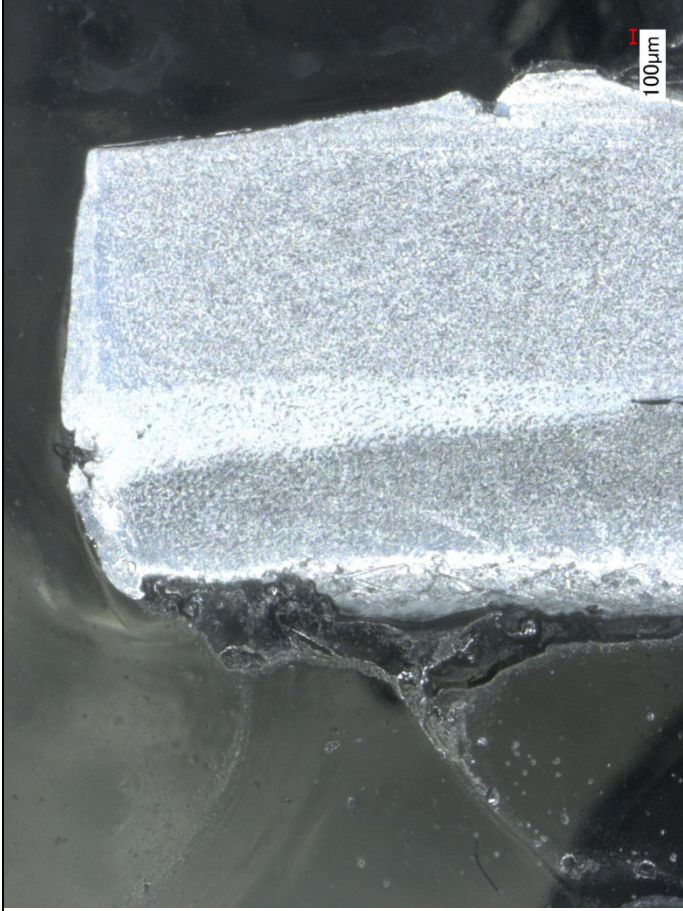
11 KF



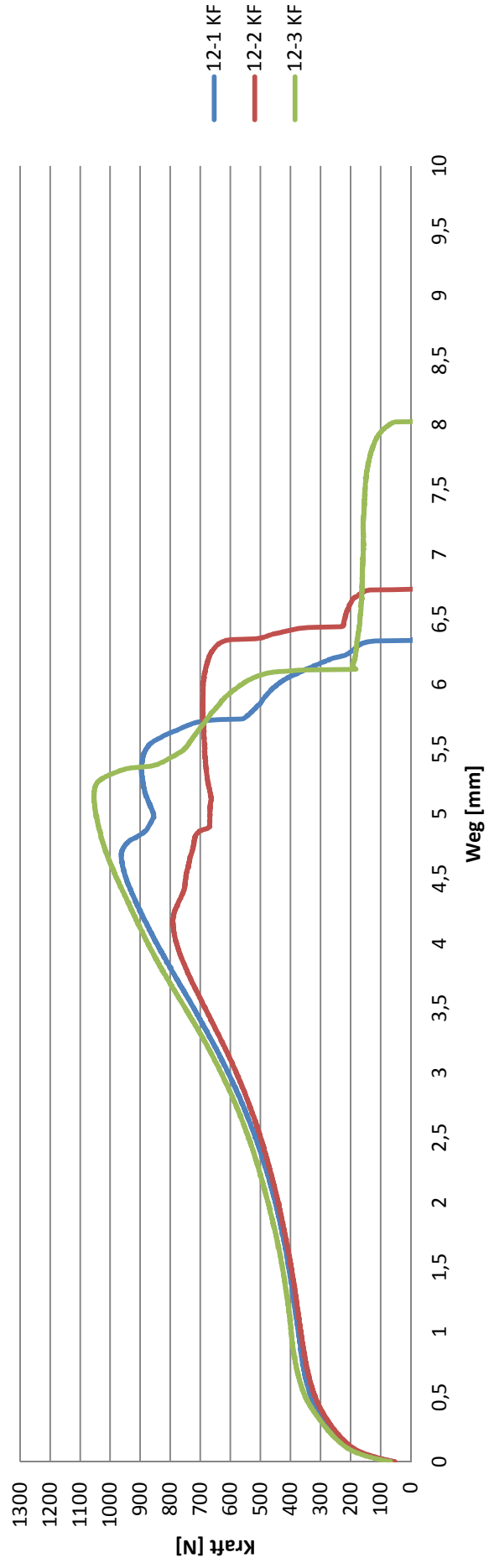


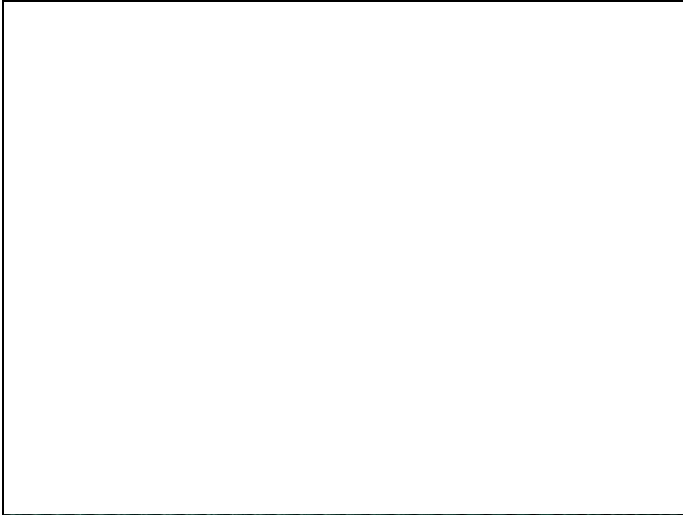
12 KE





12 KF





12s KE

